

Titre: Développement de procédés de fabrication de coupleurs à fibre
Title: optique : application aux hybrides optiques

Auteur: Marie-Hélène Bussièrès-Hersir
Author:

Date: 2018

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bussièrès-Hersir, M.-H. (2018). Développement de procédés de fabrication de coupleurs à fibre optique : application aux hybrides optiques [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/3083/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3083/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Nicolas Godbout
Advisors:

Programme: Génie physique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT DE PROCÉDÉS DE FABRICATION DE COUPLEURS À FIBRE
OPTIQUE : APPLICATION AUX HYBRIDES OPTIQUES

MARIE-HÉLÈNE BUSSIÈRES-HERSIR
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE)
AVRIL 2018

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT DE PROCÉDÉS DE FABRICATION DE COUPLEURS À FIBRE
OPTIQUE : APPLICATION AUX HYBRIDES OPTIQUES

présenté par : BUSSIÈRES-HERSIR Marie-Hélène

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LEBLOND Frédéric, Ph. D., président

M. GODBOUT Nicolas, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. DAXHELET Xavier, Ph. D., membre

DÉDICACE

*À ma famille et mes amis,
pour leur soutien tout au long de mes interminables études.*

REMERCIEMENTS

D'abord et avant tout, j'aimerais remercier énormément mon directeur de recherche, le Professeur Nicolas Godbout, pour m'avoir donné l'opportunité de faire une maîtrise recherche au Laboratoire des fibres optiques (LFO). Merci pour tout l'apprentissage inestimable que j'y ai fait, tant au niveau théorique et expérimental que personnel. Merci également pour le soutien financier et le soutien moral, principalement lors de la conférence Photonics West à San Francisco. Cette conférence m'a forcé à sortir de ma zone de confort et a été une expérience formidable. Merci donc milles fois.

J'aimerais également remercier tous mes collègues de laboratoire, en commençant par Mikaël Leduc. Un gigantesque merci à toi, Mikaël, pour tout l'apprentissage quotidien « sur le terrain » et pour le temps que tu as pris à me montrer les procédures et le fonctionnement des équipements. Sans ton expérience, ton instinct et ton soutien, je n'aurais pas fait la moitié de ce que j'ai accompli. Merci aussi pour les conversations sur divers sujets de la vie, j'ai beaucoup apprécié ces moments. Parmi les autres collègues, j'aimerais aussi remercier particulièrement Simon Bolduc Beaudoin pour avoir pris l'habitude de me faire me questionner sur tout : les méthodes de recherche, l'interprétation des résultats, les connaissances générales, la vie, etc. Merci d'avoir ébranlé ce que je pensais connaître, même si je n'y étais pas toujours ouverte, cela m'a aidé à évoluer. Un gros merci aussi pour m'avoir aidé à pratiquer ma présentation pour Photonics West, ce fut grandement apprécié. J'ai eu bien du plaisir à chanter du François Pérusse avec toi et à changer les paroles pour qu'elles aient un rapport avec les fibres optiques. Merci également à Francis Bulota pour m'avoir introduit aux projets du Laboratoire avec ses pseudo circulateurs et à Philippe Décoste pour les conversations, entre autres sur les jeux vidéos, autour d'un café.

Je veux également remercier d'anciens étudiants du LFO qui m'ont aidé à différents niveaux. Merci donc à Wendy-Julie Madore pour avoir posé les bases du projet, pour les conseils et pour avoir pris le temps de me montrer le fonctionnement du montage de caractérisation. Merci aussi à Élyes Khettal pour m'avoir également donné des conseils sur le projet lors de nos conversations à certains événements. Merci à Stéphane Virally pour avoir aidé à débloquer quelques calculs plus ardues et pour les conversations du dîner. Je n'oublierai pas que tu ne bois pas du café aromatisé.

Merci à Jean-Paul Lévesque pour les thermocouples miniatures que je ne cessais de casser et pour les conversations de corridor.

J'aimerais aussi mentionner mes amis et collègues de bureau que je suis allée déranger pendant

mes pauses pour discuter de tout et de rien. Merci donc à Étienne, PA, Annelo, Samuel (Tino), François, Audrey, Karlou, Sandryne et Jean-Francis de m'avoir laissé vous déconcentrer de temps en temps. Ces conversations m'ont aidé à décompresser et à garder le moral tout au long de la maîtrise. En plus des collègues de bureau, merci aussi à JS, Sébastien (Schran), Fred, Victor, Antoine et Cédric pour les discussions du midi.

Finalement, j'aimerais remercier mes amis proches et ma famille. Merci de m'avoir soutenu et encouragé depuis le tout début et tout au long de mon cheminement académique. Merci aussi de votre curiosité par rapport à mon projet et de ne pas rester buté par rapport au fait qu'il s'agisse de physique. Merci principalement à ma mère qui croit inconditionnellement en moi et à mon père qui, bien qu'il ne soit plus des nôtres, me donne encore aujourd'hui la détermination d'avancer. Merci à mon frère d'être là et de rire avec moi de mes maladresses. Merci aussi à tous les autres membres de ma grande famille. Toutes ces personnes ont fait en sorte que j'ai pu me rendre où je suis aujourd'hui.

RÉSUMÉ

Les hybrides optiques permettent des mesures fiables de l'amplitude d'un signal optique et de sa phase relative par rapport à un signal de référence, ou oscillateur local. La théorie prédit que, par sa symétrie, un coupleur 3×3 de géométrie équilatérale constitue un hybride optique 120° lorsque celui-ci présente une équipartition des puissances. La méthode de fusion-étirage est utilisée pour fabriquer des hybrides optiques 120° tout-fibre à partir de coupleurs optiques 3×3 . Des blocs d'étirage usinés au micron près contraignent trois fibres optiques SMF-28 à adopter une géométrie équilatérale tout au long de la fabrication des dispositifs. Les fibres sont fusionnées et étirées à l'aide d'une micro-torche dont la flamme est à base d'un mélange d'oxygène et de propane.

Plusieurs approches différentes ont été testées afin d'identifier la meilleure façon de fabriquer des hybrides optiques de manière répétable. Ces approches sont : l'étirage sans fusion, l'utilisation de torsions, l'ajout d'une étape de préforme avant la fusion, la fusion par balayage et la fusion en un passage. L'approche qui a donné les meilleurs résultats est la fusion en un passage ; tous les composants ayant pu être caractérisés entièrement sont sortis de cette approche.

Les composants fabriqués sont caractérisés en transmission par des mesures de pertes d'insertion pour des longueurs d'onde entre 1300 et 1600 nm. Leur phase relative est également caractérisée dans la bande C, de 1530 à 1565 nm. Les hybrides optiques caractérisés présentent des pertes d'excès se situant entre $0,54 \pm 0,16$ dB et $1,85 \pm 0,21$ dB de 1300 à 1600 nm et des ratios de couplage de 33,3% dont l'écart-type varie de 0,5 à 4,1% selon le dispositif à sa longueur d'onde de croisement. Les phases relatives des dispositifs caractérisés se situent entre $112,3 \pm 0,9^\circ$ et $123,2 \pm 3,6^\circ$ autour du 120° recherché et entre $236,6 \pm 2,4^\circ$ et $241,6 \pm 3,6^\circ$ pour le 240° pour toute la bande C. En comparaison avec les travaux antérieurs, les hybrides optiques entièrement caractérisés sont fabriqués sans tube de verre externe ou torsion pour maintenir la géométrie. Ils présentent généralement moins de pertes d'excès et une bonne stabilité en phase dans la bande C.

ABSTRACT

Optical hybrids enable the unambiguous measurement of both the amplitude of an optical signal and its phase relative to a reference. A fusion-tapering technique is used to produce monolithic all-fiber 3×3 optical hybrids. By a symmetry argument, theory predicts that an equilateral triangular 3×3 coupler must form a 120° hybrid whenever a power equipartition is obtained during tapering. Precision-machined holding clamps constrain three SMF-28 fibers to an equilateral triangle geometry. An oxygen-propane micro-torch is used for the fusion and tapering steps.

Several approaches have been tested to maximise the chances of having an equilateral geometry of the fibers, thus a power equipartition. Those approaches are: tapering without fusion, fusion with or without twists, fusion with twists and with a preform of the fibers and fusion in one sweep. The fusion in one sweep and without twists produced the best results. All devices that were fully characterized were produced with the fusion without sweeping method.

Fabricated devices are characterized with respect to insertion loss from 1300 to 1600 nm and relative phases in the C-band. Fabricated devices exhibit excess loss lying between $0,54 \pm 0,16$ dB and $1,85 \pm 0,21$ dB in the whole band, the coupling ratio is $33,3 \pm 0,5$ to $4,1\%$ at their coupling wavelength. The relative phases are measured within $120 \pm 10^\circ$ and $240 \pm 10^\circ$ across the whole C-band from 1530 to 1565 nm and showed a small variation of less than $3,6^\circ$ for all devices. Compared to previous work, all-fibre hybrids are fabricated without an outer glass tube, exhibit lower excess loss and good phase tolerance over the whole C-band.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiv
LISTE DES ANNEXES	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Définitions et concepts de base	1
1.1.1 Hybride optique	1
1.1.2 Technologie tout-fibre	2
1.2 Procédés de de fabrication	4
1.2.1 Contrôle de la géométrie	4
1.3 Objectifs de recherche	5
1.4 Plan du mémoire	6
CHAPITRE 2 THÉORIE	7
2.1 Couplage	7
2.2 Tolérances	12
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	19
3.1 Fabrication	19

3.1.1	Contrôle de la géométrie	19
3.2	Caractérisation	27
3.2.1	Transmission	27
3.2.2	Phase	28
CHAPITRE 4	RÉSULTATS ET ANALYSES	30
4.1	Sans fusion	30
4.2	Fusion par balayage avec torsions	30
4.3	Fusion par balayage sans torsions	33
4.4	Fusion en un passage	35
4.4.1	Difficultés rencontrées et recommandations	47
CHAPITRE 5	CONCLUSION	50
5.1	Synthèse des travaux	50
5.2	Limites de la solution proposée	51
5.3	Améliorations futures	52
RÉFÉRENCES	53
ANNEXES	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Performance des dispositifs des travaux antérieurs faits au LFO. . . .	5
Tableau 1.2	Objectifs quantitatifs de performance pour les hybrides optiques 120°. . . .	5
Tableau 3.1	Conditions d'utilisation des flammes	21
Tableau 3.2	Paramètres de la fusion à un passage.	26
Tableau 4.1	Résumé des résultats pour les différentes approches de la flamme dans le cas des fusions à un passage sur 4 mm.	39
Tableau 4.2	Résumé des performances des hybrides optiques tout-fibre complète- ment caractérisés.	45

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Représentation de la configuration équilatérale de l'hybride 120°	7
Figure 2.2	Couplage théorique du coupleur 3×3 . La courbe bleue représente la sortie associée à l'entrée du signal et la courbe verte est une superposition des sorties 2 et 3 dans lesquelles il y a eu transfert du signal.	11
Figure 2.3	Transmission théorique aux trois sorties du coupleur pour une injection normalisée du signal.	13
Figure 2.4	Représentation polaire de l'amplitude et la phase aux trois sorties du coupleur pour une injection normalisée du signal.	13
Figure 2.5	Puissances dans les trois branches de sortie en fonction de γ pour un signal unitaire injecté dans l'entrée 1, 2 et 3, montrées en (a), (b) et (c) respectivement. La perturbation normalisée est de $\varepsilon = 0,1$	16
Figure 2.6	Battements en sortie (a, c et e) et représentation polaire du signal (b, d et f) lorsqu'un signal et une référence déphasés de ϕ sont injectés dans deux entrées différentes du coupleur 3×3 ayant une perturbation normalisée $\varepsilon = 0,1$. L'injection est décrite par le vecteur t_{ph1} , t_{ph2} et t_{ph3} sur la première, deuxième et troisième ligne respectivement. . . .	18
Figure 3.1	Montage de fusion-étirage en vue de face (figure du haut) et de haut (figure du bas). Deux blocs montés sur des platines motorisées contiennent des pinces pour tenir les fibres en place. Une micro-torche est montée sur une platine trois axes (non montrée).	20
Figure 3.2	Section droite d'un coupleur 3×3 fusionné à différents degrés de fusion. Dans l'ordre, les degrés de fusion sont de 0, environ 0,25 et 0,75, le dernier de 1.	20
Figure 3.3	Vue transverse du bloc sur lequel sont installées les fibres pour la fabrication des coupleurs 3×3 en configuration équilatérale. Les petits cercles représentent les fibres de silice placées en contact par une rainure triangulaire à proximité de la zone chauffée entre les blocs. Les grands cercles représentent les fibres avec leur gaine protectrice de polymère, placées en triangle dans une seconde rainure se trouvant plus loin sur le bloc. Les deux rainures sont conçues de sorte que les centres des triangles coïncident.	22

Figure 3.4	Exemples de coupes transverses de structures fusionnées de coupleurs 3×3. Une structure ratée (a) est trop asymétrique pour former un hybride optique. La structure souhaitée (b) est obtenue après un essai réussi. Le test étant destructif, ces structures clivées ne peuvent servir à former un hybride optique.	22
Figure 3.5	Profil longitudinal de préforme des fibres effectuée afin de favoriser la fusion de structures torsadées.	25
Figure 3.6	Paramètres de la méthode de fusion à un passage.	26
Figure 3.7	Montage de caractérisation en phase des coupleurs 3×3, modifié de Madore (2012).	28
Figure 4.1	Transmission d'un coupleur fabriqué par l'approche sans fusion. . . .	31
Figure 4.2	Courbes de transmission de trois coupleurs différents avec la méthode de fusion par balayage et torsions.	32
Figure 4.3	Exemple de non homogénéité de la zone chauffée lors de l'étape de fusion avec préforme.	34
Figure 4.4	Courbes de pertes d'excès pour les coupleurs fabriqués avec la fusion par balayage et sans les torsions.	34
Figure 4.5	Exemples de fusions associées a) à une géométrie équilatérale des fibres et b) à une géométrie isocèle des fibres	36
Figure 4.6	Différents exemples d'uniformité des fusions à un passage, pour a) une fusion réussie, b) une fusion uniforme dont la géométrie résultante n'est pas équilatérale et c) une fusion non uniforme dont la section de gauche est équilatérale et non la section de droite.	37
Figure 4.7	Courbes de transmission de l'hybride optique fabriqué avec une fusion à un passage sur 6 mm où l'injection est faite par a) l'entrée 1 et par b) l'entrée 2.	39
Figure 4.8	Courbe de transmission du coupleur débalancé du montage de caractérisation en phase, tiré de Madore (2012).	40
Figure 4.9	Pertes d'excès associées aux différentes approches de flammes décrites au tableau 3.2.	41
Figure 4.10	Courbes de transmission des coupleurs 3×3 fabriqués selon l'approche 3, pour un signal envoyé dans a) l'entrée 2 et b) l'entrée 3 du coupleur.	42
Figure 4.11	Courbes de transmission pour un même coupleur lorsque le signal est injecté dans la branche bleue (a et b), la branche rouge (c et d) et la branche verte (e et f)	43
Figure 4.12	Résultats en phase pour les trois paires d'entrées testées.	45

Figure 4.13	Résultats en amplitude et en phase pour les trois paires d'entrées testées.	46
Figure A.1	Résultats de caractérisation en phase de l'hybride H4-4.	56
Figure A.2	Courbes de transmission pour l'hybride H4-4.	57
Figure A.3	Résultats de caractérisation en phase de l'hybride H4-7.	58
Figure A.4	Courbes de transmission pour l'hybride H4-7.	59
Figure A.5	Résultats de caractérisation en phase de l'hybride H4-9.	60
Figure A.6	Courbes de transmission pour l'hybride H5-1.	61

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

0.1 Variables

A_S	Amplitude du signal analysé
A_R	Amplitude du signal de référence
a_i	Amplitude du champ électrique dans la fibre i , $i = 1,2,3$
C	Coefficient de couplage
d	Déviaton du couplage associé à une légère asymétrie de la structure monolithique
d	Distance entre deux coeurs
D_f	Degré de fusion
E_i	Éléments de la matrice de transfert avec asymétrie, $i = 1,2,3,4$
E_B	Entrée 1, ou bleue, d'injection
E_R	Entrée 2, ou rouge, d'injection
E_V	Entrée 3, ou verte, d'injection
h_f	Hauteur de fusion de la flamme par rapport aux fibres
Δh	Différence entre la hauteur d'approche de la flamme et sa hauteur de fusion
L	Longueur de la zone monolithique des coupleurs
\mathbf{M}	Matrice de couplage
n_{eff}	Indice effectif de réfraction
P_i	Puissance à la sortie i
$T_{3 \times 3}$	Matrice de transfert du coupleur 3×3
T_A	Vecteur de transmission en amplitude
$T_{br,i}$	Taux de branchement pour l'entrée i
T_P	Vecteur de transmission en puissance
t_{phi}	Vecteur d'injection du signal dans la branche i et de la référence avec laquelle il est déphasé
t_{ij}	Transmission de la fibre d'injection i à la fibre de sortie j
t_{Pi}	Vecteur de puissance unitaire d'injection dans la branche i du coupleur
\mathbf{P}	Matrice de changement de base des modes individuels aux supermodes
V_i	Vecteur de propagation dans la fibre i
z	Direction de propagation
z_d	Longueur associée à la descente de la flamme

z_f	Longueur associée à la fusion des fibres
z_m	Longueur associée à la remontée de la flamme

0.2 Symboles grecs

β	Constante de propagation
γ	Paramètre de couplage
ϵ_{ph}	Erreur sur la phase
ε	Perturbation normalisée du couplage
λ	Longueur d'onde
λ_c	Longueur d'onde de croisement
ξ_E	Pertes d'excès
ρ_{go}	Rayon de la gaine optique
ϕ_i	Phase accumulée par le i-ième supermode
φ	Différence de phase entre le signal et l'oscillateur local

0.3 Acronymes

LFO	Laboratoire des fibres optiques
OCT	Tomographie à cohérence optique (OCT pour Optical Coherent Tomography)
PDL	Pertes dépendantes de la polarisation (PDL pour Polarisation Dependant Loss)
SMF	Fibre monomode (SMF pour Single Mode Fiber)
WDM	Multiplexeur diviseur de longueur d'onde (WDM pour Wavelength Division Multiplexer)
WIC	Coupleur indépendant en longueur d'onde (WIC pour Wavelength Independent Coupler)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Résultats supplémentaires	56
Annexe B	Code Mathematica	62

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Un hybride optique est un composant permettant de déterminer sans ambiguïté l'amplitude et la phase d'un signal optique par rapport à un signal de référence, aussi appelé oscillateur local. Un hybride possède donc deux entrées indépendantes (référence et signal) et au moins trois sorties dans lesquelles un signal de battement peut être mesuré. Il présente donc deux caractéristiques principales : une répartition des puissances en sortie pour chaque entrée ; et une relation de phase entre les sorties propre à l'hybride conçu. Pour un hybride optique 120° par exemple, les phases relatives attendues aux trois sorties sont de 0 , 120 et 240° respectivement. Ces composants sont très utiles pour les applications impliquant la détection cohérente, par exemple les télécommunications à très haut débit (standard 100G), la métrologie et l'imagerie biomédicale.

Il est possible de fabriquer des hybrides optiques sur une plateforme d'optique intégrée ou avec des fibres optiques. Les hybrides optiques tout-fibre sont fabriqués sous forme de coupleurs à fibres optiques fusionnées latéralement en structure monolithique. Les hybrides 120° sont fabriqués sous forme de coupleurs 3×3 dont la structure fusionnée est formée de trois fibres en configuration en triangle équilatéral. Le défi principal de fabrication concerne le contrôle de la structure avant et pendant la fusion.

1.1 Définitions et concepts de base

1.1.1 Hybride optique

L'hybride optique comporte deux entrées, une pour le signal et l'autre pour un oscillateur local servant de référence. Les hybrides optiques les plus courants comportent généralement trois ou quatre sorties. Pour être considéré un hybride, le composant doit exhiber : 1) une répartition des puissances aux sorties peu importe le port d'entrée ; 2) sur chaque port de sortie, un signal de battement des signaux des deux entrées avec une phase relative différente. Pour les hybrides à trois branches de sortie, appelés hybrides 120° les phases attendues sont de 0 , 120 et 240° . Alternativement, les hybrides à quatre branches de sortie sont appelées hybrides 90° , avec des phases relatives à la sortie du composant sont de 0 , 90 , 180 et 270° .

À cause de leurs propriétés particulières, les hybrides optiques de bonne qualité peuvent être utilisés dans plusieurs domaines. Le domaine pour lequel les propriétés de phase sont les plus utiles concerne la détection cohérente, où énormément d'études ont été faites pour les télécommunications (Davis et al., 1986; Stephens and Nicholson, 1987; Yamashita, 1994; Xie

et al., 2012; Dong et al., 2014) et également dans la tomographie par cohérence optique, ou OCT, où l'utilisation d'un hybride 120° permet de lever l'ambiguïté de phase qui existe avec les systèmes utilisant les coupleurs 2×2 (Sarunic et al., 2005). Des applications dans des systèmes de gyroscopes (Sheem, 1980), de senseurs interférométriques (Sheem, 1981; Koo et al., 1982; Priest, 1982; Zhang et al., 2011) ont également été relevés.

Les hybrides optiques existent sous deux formes : l'optique intégrée et les composants tout-fibre. En ce qui concerne l'optique intégrée, les hybrides optiques sont fabriqués par gravure sur des substrats semi-conducteurs, tels le silicium (Dong et al., 2014; Saber et al., 2017) ou le phosphate d'indium (InP) (Pustakhod et al., 2015; Kim et al., 2016). Bien que les pertes de ces dispositifs soient bien plus élevées que ce qui peut être théoriquement fait avec la technologie tout-fibre, ils ont l'avantage de pouvoir être fabriqués relativement facilement de manière répétable. La théorie prédit tout de même qu'il est possible de fabriquer des hybrides en optique intégrée avec des pertes assez basses, autour de 1,62 dB (Villalba Jimenez, 2014), et même en dessous de 1 dB (Zimmermann et al., 2009). Cependant, ces pertes ne tiennent pas compte de celles associées au couplage des dispositifs avec les fibres optiques acheminant le signal du reste du système, qui se situent habituellement autour de 2,5 dB (Dong et al., 2014; Kim et al., 2016).

Avec la technologie tout-fibre, il est en principe possible de fabriquer minutieusement des hybrides optiques en coupleurs 3×3 avec des performances comparables à celles des coupleurs 2×2 . C'est-à-dire que les pertes totales, ou pertes d'excès, peuvent être aussi basses que 0,1–0,2 dB. Très peu de travaux ont été faits par rapport à la fabrication et caractérisation des hybrides optiques 120° . Les travaux les plus détaillés sur les hybrides optiques tout-fibre proviennent d'anciens étudiants du Laboratoire des fibres optiques (Madore, 2012; Khettal, 2014).

1.1.2 Technologie tout-fibre

L'utilisation des dispositifs fibrés est souvent plus avantageux par rapport aux alternatives comme les montages classiques, dits *emphfree space*, et l'optique intégrée. Les montages optiques à l'air libre sont désavantagés par rapport aux montages fibrés par la nécessité d'un alignement précis et de sa préservation à long terme. Un mouvement de quelques micromètres du faisceau sur une face de fibre de sortie occasionne des pertes significatives. À ces pertes s'ajoutent les pertes intrinsèques des composants. Ainsi, plus un montage comporte de composants, plus les pertes sont élevées. En contrepartie, les pertes dans un montage complètement fibré sont principalement intrinsèques aux composants, de l'ordre des dixièmes de dB pour des coupleurs optiques 2×2 par exemple. Les pertes associées à la fusion de deux fibres

bout-à-bout, ou épissure, sont de l'ordre des centièmes de dB, et donc négligeables. L'optique intégrée présente également des pertes de changement de milieu et des pertes intrinsèques. Ces pertes sont cependant beaucoup plus importantes que pour les composants des montages *free space*. D'abord, la différence d'indice de réfraction entre la silice et les semi-conducteurs utilisés pour le guidage de la lumière est beaucoup plus grande que celle entre la silice et l'air. Les pertes par diffusion et par réflexions de Fresnel sont donc plus importantes. Ensuite, l'optique intégrée engendre des pertes en transmission autour de 1–2 dB/cm, ce qui est énorme par rapport à la fibre optique, où les pertes en transmission tournent autour de 0,2 dB/km.

Il existe aujourd'hui des composants fibrés de toutes sortes. Le composant le plus connu du genre passif est le coupleurs 2×2 . Il s'agit de deux fibres optiques fusionnées latéralement, puis étirées suffisamment pour que le signal puisse être transféré, en partie ou en totalité, d'une fibre à l'autre. La version la plus simple de ce composant est un séparateur de puissance à une longueur d'onde donnée. Tout dépendant de comment il est fabriqué, ce composant d'apparence simple présente des caractéristiques diverses. Il est aisé, par exemple, de choisir à quelle longueur d'onde le coupleur sépare la puissance et avec quelle proportion. Il est également possible d'obtenir un composant qui divise le signal indépendamment de la longueur d'onde. On dénote un tel composant par l'acronyme WIC, pour *Wavelength Independent Coupler*. Un autre exemple de coupleur 2×2 commun transfère le signal pour une longueur d'onde donnée d'une branche à l'autre, mais le conserve dans la même branche pour une autre longueur d'onde. On désigne ce type de coupleur par l'acronyme WDM pour l'expression anglaise *Wavelength Division Multiplexer*. Il est utilisé pour mélanger ou séparer deux longueurs d'onde.

L'ajout d'une troisième fibre optique au coupleur 2×2 pour en faire un coupleur 3×3 , ou même d'une quatrième fibre pour les coupleurs 4×4 , est une évolution naturelle de la recherche sur les dispositifs fibrés. La fibre supplémentaire des coupleurs 3×3 augmente les possibilités de géométrie de fabrication par rapport aux coupleurs 2×2 . En effet, ces derniers n'ont qu'une géométrie possible : linéaire. Les fibres des coupleurs 3×3 peuvent, tout comme les 2×2 , être disposées côte-à-côte, donc linéairement, avant leur fusion, ou bien en triangle. La configuration linéaire présente peu de propriétés attrayantes, mais la configuration triangulaire, lorsqu'elle est équilatérale, est particulièrement intéressante. Par la symétrie de cette configuration, le coupleur 3×3 peut jouer le rôle d'un hybride optique, où il y a une relation de phase favorable entre les branches de sortie. Plusieurs fournisseurs de produits fibrés vendent des coupleurs 3×3 avec des performances variables concernant la transmission, mais aucun ne fait état du comportement en phase de leurs dispositifs.

1.2 Procédés de fabrication

Presque toutes les études faisant état de la fabrication de coupleurs tout-fibre 3×3 utilisent, à la base, la méthode de fusion-étirage. Cette technique de fabrication sera décrite en détails à la section 3. La méthode classique consiste sommairement à coller ensemble mécaniquement et latéralement les fibres à fusionner. Par la suite, une flamme très chaude balaie les fibres d'assez près et assez longtemps pour qu'elles fusionnent. Finalement, une flamme moins chaude balaie également les fibres pendant que des blocs d'étirage tirent de chaque côté les fibres. Par conservation du volume, la section transverse diminue, ainsi que les cœurs des différentes fibres fusionnées. À partir d'une certaine taille, le champ confiné dans le cœur de chaque fibre d'injection fuit et interagit avec les deux autres. C'est alors qu'on dit qu'il y a couplage entre les fibres.

Une seule autre méthode de fabrication d'un coupleur 3×3 a été décrite, basée sur des réseaux à longs pas gravés dans les trois fibres distinctes installées en triangle équilatéral (Liu et al., 2007). La présence des réseaux à longs pas dans le cœur des fibres force le signal à coupler avec les modes de gaine. Par le champ évanescent du signal et la présence des réseaux longs pas dans les fibres, un couplage du signal entre les trois fibres est possible. Les phénomènes de couplages sont plus complexes dans ce genre de coupleur et il est difficile de dire si, dans ces conditions, les phases relatives aux sorties sont déterminées comme celles des coupleurs fabriqués par fusion-étirage en géométrie équilatérale. Les pertes d'excès des coupleurs 3×3 sont relativement élevées, soit de 1,4 dB à 1505,5 nm.

1.2.1 Contrôle de la géométrie

Bien que la quasi-totalité des équipes de recherche utilisent la méthode de fusion-étirage pour fabriquer les coupleurs 3×3 , il existe tout de même certaines différences dans les étapes de fabrication. Ces différences proviennent du désir de maintenir une géométrie équilatérale entre les trois fibres fusionnées, car c'est cette géométrie qui assure que le coupleur 3×3 démontre les propriétés caractéristiques d'un hybride optique 120° . Quelques approches sont utilisées dans la littérature pour maintenir une géométrie équilatérale, comme des torsions (Davis et al., 1986; Birks, 1992; Jung et al., 2013; Chen et al., 2018), l'utilisation d'une structure externe comme un tube capillaire en verre installé autour des fibres (Giles et al., 2014), des fils avec poids (Khettal, 2014) ou des rainures forçant la configuration équilatérale (Xie, 1991; Madore, 2012). Les tubes capillaires ont aussi été utilisés pour la fabrication de coupleurs 4×4 avec d'excellentes performances (pertes d'excès de moins de 0,2 dB) Mortimore (1990).

Dans la catégorie hybrides optiques tout-fibre, le tableau 1.1 résume les deux caractéristiques

à partir desquelles, lorsque disponibles, les composants fabriqués seront principalement comparés. On remarque que très peu d'études ont caractérisé les phases des dispositifs fabriqués.

Tableau 1.1 Performance des dispositifs des travaux antérieurs faits au LFO.

Étude	Maintient de géométrie	Pertes d'excès	ϵ_{ph}
Davis et al. (1986)	Torsions	-	-
Xie (1991)	Rainures	$< 0,7$ dB	-
Birks (1992)	Torsions	$\sim 0,2$ dB	-
Takushima et al. (2008)	-	-	$\pm 1^\circ$
Madore (2012)	Rainures	< 5 dB	$\leq 9^\circ$
Jung et al. (2013)	Torsions	$0,5\text{--}2$ dB	-
Khettal (2014)	Fils avec poids	$< 0,8$ dB	$\pm 5^\circ$

1.3 Objectifs de recherche

Les présents travaux mettent l'accent sur la fabrication de composants tout-fibres à partir de trois fibres optiques en silice SMF-28. Le dispositif visé est un hybride optique 120° dont les objectifs de performance sont résumés au tableau 1.2, où λ_c fait référence à la longueur d'onde de croisement, c'est-à-dire la longueur d'onde à laquelle il y a équipartition des puissances. La largeur de bande pour laquelle ces objectifs doivent présenter peu de variabilité va de 1530 à 1565 nm, soit la bande C des télécommunications, mais les dispositifs seront testés de 1300 à 1600 nm.

Tableau 1.2 Objectifs quantitatifs de performance pour les hybrides optiques 120° .

Propriété	Objectif
Pertes d'excès	< 1 dB
λ_c	1550 ± 5 nm
Phases à λ_c	$0, 120$ et $240 \pm 10^\circ$
Ratio de couplage à λ_c	$33/33/33 \pm 1\%$
Largeur de bande	1530 à 1565 nm

1.4 Plan du mémoire

Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Le Chapitre 2 fait d'abord état, à l'aide de développements mathématiques, de la théorie derrière le comportement des hybrides optiques 120° . Il exprime d'abord le couplage théorique des coupleurs 3×3 et trouve ensuite un ensemble de conditions pour que le coupleur exhibe une équipartition des puissances. À partir de ces conditions, il dévoile naturellement les phases relatives de 0 , 120 et 240° des trois sorties entre elles. Puis, une étude des tolérances est faite à partir des équations pour une légère déviation des fibres par rapport à la configuration équilatérale idéale.

Le Chapitre 3 concerne les manipulations expérimentales pour la fabrication des coupleurs optiques 3×3 . Il décrit en détails la méthode de fusion-étirage et les caractérisations en transmission et en phase effectuées sur les dispositifs. Pour la fabrication, plusieurs méthodes servant à maximiser la répétabilité d'une géométrie équilatérale des fibres sont décrites et testées. Les approches décrites dans ce chapitre sont un étirage sans fusion, une fusion avec ou sans torsions et avec ou sans préforme pour stabiliser les torsions et finalement une fusion à un passage.

Le Chapitre 4 présente tous les résultats obtenus suite aux expérimentations effectuées dans le cadre de cette recherche, à partir des tests et mesures décrits dans le chapitre précédent. Il s'agit donc des résultats de la caractérisation en transmission selon toutes les approches de fusion effectuées sur les coupleurs. Les différentes approches sont principalement comparées sur la base de leur transmission et de leur pertes d'excès. Pour les coupleurs qui produisent des hybrides optiques, leur comportement en phase est également présenté.

Enfin, une conclusion contient une discussion des résultats, des limites rencontrées et de quelques suggestions pour le futur.

CHAPITRE 2 THÉORIE

La théorie derrière le comportement des hybrides optiques 120° fabriqués à partir de coupleurs 3×3 se résume à la résolution de la matrice de couplage entre les trois fibres. Les informations concernant la transmission et la phase des composants en découlent naturellement.

2.1 Couplage

Le comportement des hybrides optiques 120° tout-fibre est relativement simple à déterminer à cause de la symétrie de leur structure en triangle équilatéral. La figure 2.1 montre la structure non fusionnée des trois fibres en configuration triangle équilatéral, où les numéros et les couleurs servent à identifier les fibres individuelles. Ces conventions seront utilisées plus tard, lors de l'analyse des résultats.

L'équation différentielle 2.1 décrit l'amplitude locale du champ électrique dans les trois fibres individuelle, où a_1 , a_2 et a_3 sont les amplitudes dans les fibres 1, 2 et 3 respectivement et M est la matrice de couplage, décrite par 2.2.

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = i M \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$M = \begin{bmatrix} \beta & C & C \\ C & \beta & C \\ C & C & \beta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

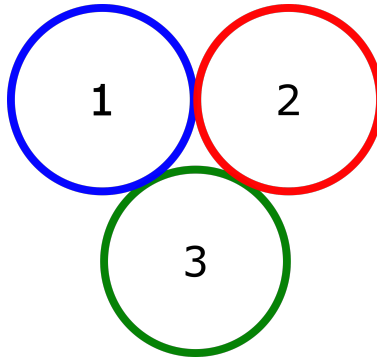


Figure 2.1 Représentation de la configuration équilatérale de l'hybride 120° .

où C est le coefficient de couplage, $\beta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda}$ est la constante de propagation du mode fondamental guidé dans chaque fibre individuelle, avec n_{eff} l'indice effectif et λ la longueur d'onde dans le vide. Par symétrie, le coefficient de couplage C est identique pour toute paire de fibres. On cherche à déterminer la matrice de transfert du coupleur à partir de sa matrice de couplage. On calcule d'abord les valeurs propres et les vecteurs propres associés qu'on calcule comme

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \beta + 2C \\ \lambda_2 &= \lambda_3 = \beta - C\end{aligned}\tag{2.3}$$

et

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, V_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, V_3 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 2 \end{bmatrix}.\tag{2.4}$$

Les vecteurs propres V_i décrivent respectivement les supermodes SLP_{01} , SLP_{11y} et SLP_{11x} .

Pour exprimer la matrice de transfert du composant selon les modes individuels, on fait un changement sur la base des supermodes. Le changement de base des modes individuels aux supermodes s'exprime par la matrice

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} V_1^\dagger \\ V_2^\dagger \\ V_3^\dagger \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} \end{bmatrix}\tag{2.5}$$

où V^\dagger exprime la transposée-conjuguée de V . La matrice de transfert est obtenue en appliquant le changement de base, en déphasant les supermodes et en revenant sur la base des guides individuels.

$$T_{3 \times 3} = \mathbf{P}^\dagger \begin{bmatrix} e^{i\varphi_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\varphi_3} \end{bmatrix} \mathbf{P}\tag{2.6}$$

où φ_i représente la phase accumulée par le i -ième supermode.

$$\varphi_1 = \int_L \lambda_1 dz = \int_L (\beta + 2C) dz\tag{2.7a}$$

$$\varphi_{2,3} = \int_L \lambda_{2,3} dz = \int_L (\beta - C) dz\tag{2.7b}$$

Les supermodes 2 et 3 sont dégénérés dans le cas où la symétrie triangulaire est parfaite.

Après substitution et simplification, on obtient la matrice de transfert

$$T_{3 \times 3} = \frac{1}{3} e^{i \int_L (\beta - C) dz} \begin{bmatrix} 2 + e^{2i\gamma} & -1 + e^{2i\gamma} & -1 + e^{2i\gamma} \\ -1 + e^{2i\gamma} & 2 + e^{2i\gamma} & -1 + e^{2i\gamma} \\ -1 + e^{2i\gamma} & -1 + e^{2i\gamma} & 2 + e^{2i\gamma} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

où L est la longueur de la zone monolithique, z la direction de propagation et

$$\gamma = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} = \frac{3 \int_L C dz}{2}.$$

En mettant en évidence le facteur $e^{i\gamma}$, on peut simplifier la matrice comme

$$T_{3 \times 3} = \frac{e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)/2}}{3} \begin{bmatrix} 3 \cos(\gamma) - i \sin(\gamma) & 2i \sin(\gamma) & 2i \sin(\gamma) \\ 2i \sin(\gamma) & 3 \cos(\gamma) - i \sin(\gamma) & 2i \sin(\gamma) \\ 2i \sin(\gamma) & 2i \sin(\gamma) & 3 \cos(\gamma) - i \sin(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

On cherche maintenant les conditions supplémentaires à imposer à la matrice de transfert afin d'obtenir un hybride optique 120°. On sait que l'une des propriétés attendues de l'hybride est l'équipartition des puissances. Ainsi, lorsqu'on injecte le signal dans une branche, le tiers de la puissance devrait être observé dans chacune des trois sorties. Pour exprimer cette propriété, on multiplie la matrice de transfert par un vecteur représentant l'injection du signal dans une entrée, soit l'opération suivante :

$$\text{si } T_{3 \times 3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \end{bmatrix} \text{ alors } \begin{bmatrix} |t_{11}| \\ |t_{12}| \\ |t_{13}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

L'égalité présentée à l'équation 2.10 amène à une contrainte sur la valeur que doit satisfaire γ pour obtenir l'équipartition. On remarque que le résultat est similaire peu importe par quelle entrée le signal est injecté, menant à la condition $|t_{ij}| = 1/\sqrt{3}$. Il faut donc satisfaire les égalités

$$\left| \frac{3 \cos(\gamma) - i \sin(\gamma)}{3} \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2.11a)$$

$$\left| \frac{2i \sin(\gamma)}{3} \right| = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2.11b)$$

La seconde condition est respectée pour

$$\gamma = \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}, \dots \quad (2.12)$$

et on vérifie la première condition par

$$\begin{aligned} \sqrt{8 \cos^2(\gamma) + 1} &= \sqrt{3} \\ \cos(\gamma) &= \pm \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

effectivement respectée pour les mêmes valeurs de γ .

Pour obtenir le vecteur de transmission selon la puissance et non l'amplitude du signal, on prend la norme au carré de chaque amplitude du vecteur de sortie. Un signal d'amplitude unité entrant dans la branche 1 résulte en un vecteur de puissances de sortie

$$\left\| T_{3 \times 3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\|^2 = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 8 \cos^2(\gamma) + 1 \\ 4 \sin^2(\gamma) \\ 4 \sin^2(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

La symétrie de la structure impose un résultat similaire pour une entrée dans la branche 2 ou 3.

La figure 2.2 présente la puissance aux trois sorties du dispositif en fonction du paramètre de couplage γ . Les croisements des courbes correspondent aux points d'équipartition de la puissance et se trouvent aux valeurs de déphasage calculées en 2.12.

La condition d'équipartition étant remplie, il reste à vérifier le comportement en phase du coupleur. Les phases relatives sont révélées lors de l'injection de deux signaux d'entrée. On injecte un signal d'amplitude A_S et une référence A_R décalés d'une phase ϕ dans deux entrées distinctes. On obtient alors les relations suivantes pour les amplitudes des champs électriques aux trois sorties.

$$T_A = \frac{T_{3 \times 3}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} A_S e^{\frac{i\phi}{2}} \\ A_R e^{\frac{-i\phi}{2}} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{e^{i(\phi_1 + \phi_2)/2}}{3\sqrt{2}} \begin{bmatrix} A_S e^{\frac{i\phi}{2}} (3 \cos(\gamma) - i \sin(\gamma)) + 2i A_R e^{\frac{-i\phi}{2}} \sin(\gamma) \\ 2i A_S e^{\frac{i\phi}{2}} 2 \sin(\gamma) + A_R e^{\frac{-i\phi}{2}} (3 \cos(\gamma) - i \sin(\gamma)) \\ 2i (A_S e^{\frac{i\phi}{2}} + A_R e^{\frac{-i\phi}{2}}) \sin(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Encore une fois, le vecteur des transmissions en puissance est obtenu comme la norme au carré de chaque élément. L'équation 2.12 donne les valeurs de γ produisant l'équipartition. On substitue γ par la première de ces valeurs, soit $\pi/3$. On vérifie que le déphasage du

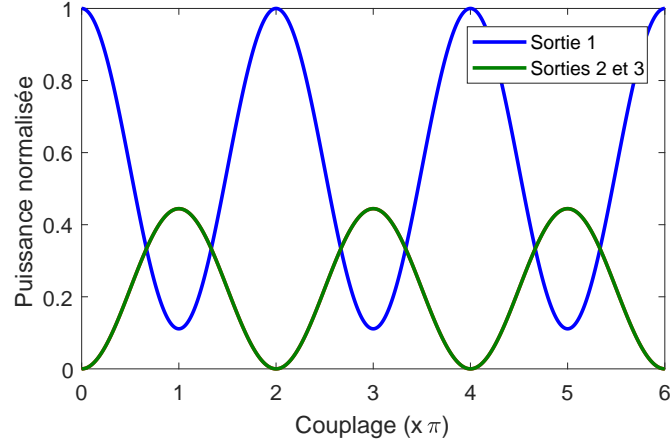


Figure 2.2 Couplage théorique du coupleur 3×3 . La courbe bleue représente la sortie associée à l'entrée du signal et la courbe verte est une superposition des sorties 2 et 3 dans lesquelles il y a eu transfert du signal.

battement entre chaque paire de sorties est bien de 120°

$$T_{P,\gamma=\frac{\pi}{3}} = \|T_{A,\gamma=\frac{\pi}{3}}\|^2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \frac{A_S^2 + A_R^2}{2} + A_S A_R \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{A_S^2 + A_R^2}{2} + A_S A_R \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{A_S^2 + A_R^2}{2} + A_S A_R \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

comme en témoigne les trois arguments des fonctions cosinus.

À partir des puissances de sorties présentées en 2.16, on a toutes les informations nécessaires pour retrouver l'amplitude et la phase d'un signal A_S , connaissant l'amplitude du signal de référence A_R . Après un peu d'algèbre, on trouve les expressions

$$\begin{aligned} |A_S A_R| \cos(\phi) &= 2P_3 - P_2 - P_1 \\ |A_S A_R| \sin(\phi) &= \sqrt{3}(P_2 - P_1) \end{aligned} \quad (2.17)$$

On déduit alors l'amplitude complexe du signal, facilement représentable sur un graphique polaire où A_S est le rayon et ϕ l'angle.

Finalement, il est possible de simplifier l'expression 2.16 lorsque les amplitudes à l'entrée sont

égales et unitaires. On trouve alors le vecteur

$$T_P = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 + \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ 1 + \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ 1 + \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

La figure 2.3 présente la transmission aux trois sorties associée au vecteur 2.18. La représentation polaire de ce signal est montré à la figure 2.4 où le rayon fait état de l'amplitude de l'onde et l'angle de sa phase.

2.2 Tolérances

Lors de la fabrication des hybrides optiques, la symétrie triangulaire exacte n'est pas nécessairement respectée. Pour avoir une idée de l'impact que la géométrie du coupleur peut avoir sur son équipartition et les phases relatives à la sortie, on reprend les mêmes étapes qu'à la sous-section précédente en ajoutant une petite déviation d par rapport à la structure idéale. On soustrait cette valeur d du coefficient de couplage C d'une paire de fibres dans la matrice de couplage. Cette réduction du coefficient de couplage modélise un défaut couramment observé lors de la fabrication : l'absence de contact entre une paire de fibre, résultant en une géométrie en triangle isocèle.

La matrice de couplage s'écrit donc maintenant

$$M = \begin{bmatrix} \beta & C - d & C \\ C - d & \beta & C \\ C & C & \beta \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Le calcul exact des vecteurs propres et valeurs propres génère des expressions très lourdes. Pour plus de clarté, on fait un calcul perturbatif limité au premier ordre.

On trouve les valeurs propres suivantes au premier ordre de perturbation, légèrement différentes de celles trouvées en 2.3,

$$\lambda_1 = \beta + 2C \left(1 - \frac{\varepsilon}{3}\right) \quad (2.20a)$$

$$\lambda_2 = \beta - C(1 - \varepsilon) \quad (2.20b)$$

$$\lambda_3 = \beta - C \left(1 + \frac{\varepsilon}{3}\right) \quad (2.20c)$$

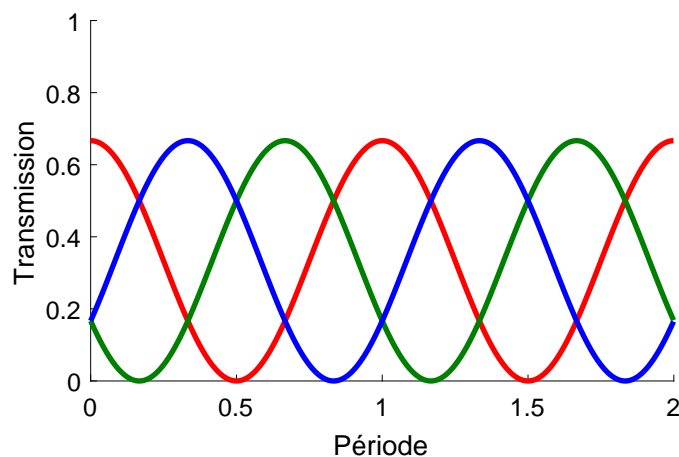


Figure 2.3 Transmission théorique aux trois sorties du coupleur pour une injection normalisée du signal.

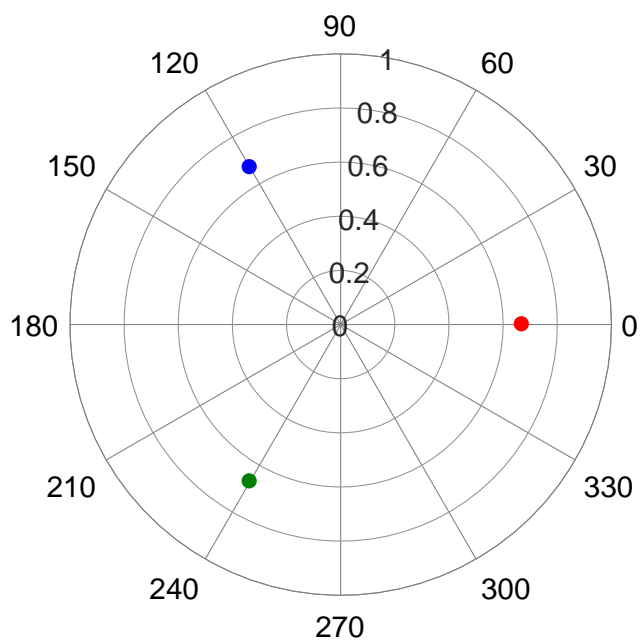


Figure 2.4 Représentation polaire de l'amplitude et la phase aux trois sorties du coupleur pour une injection normalisée du signal.

où on définit une perturbation normalisée

$$\varepsilon = \frac{d}{C}.$$

On remarque que le bris de symétrie lève la dégénérescence des supermodes SLP₁₁.

Les vecteurs propres associés à ces nouvelles valeurs propres, limités à l'ordre 1, s'expriment comme

$$V_1 = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\varepsilon}{3} \\ 1 - \frac{\varepsilon}{3} \\ 1 \end{bmatrix}, V_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, V_3 = \begin{bmatrix} -1 - \frac{\varepsilon}{3} \\ -1 - \frac{\varepsilon}{3} \\ 2 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

On vérifie rapidement que pour $d = 0$, donc pour $\varepsilon = 0$, on obtient les mêmes valeurs propres et vecteurs propres que pour la structure parfaitement équilatérale. La matrice de transfert se calcule selon la même procédure que précédemment

$$T_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\varphi_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\varphi_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^\dagger \\ V_2^\dagger \\ V_3^\dagger \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

où φ_i représente la phase accumulée par le supermode i , comme précédemment. Même au premier ordre de perturbation, on obtient alors une matrice de transfert 2.23 beaucoup plus complexe que pour le cas équilatéral. Les calculs symboliques ont été effectués à l'aide du logiciel Mathematica (Wolfram Research). La séquence de calculs est la suivante : normalisation des vecteurs propres, construction de la matrice de passage et son adjoint, expression exacte de la matrice de transfert, expression en série de Taylor en ε limité au premier ordre, simplifications par le logiciel, manipulations algébriques faites “à la main” pour obtenir une expression présentable. On exprime alors la matrice de transfert comme

$$T_{3 \times 3} = \frac{e^{i \int_L (\beta - C) dz}}{3} \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 \\ E_2 & E_1 & E_3 \\ E_3 & E_3 & E_4 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

où

$$\begin{aligned}
E_1 &= 2 + e^{2i\gamma} + \frac{2\varepsilon}{9} (1 + 4i\gamma - e^{2i\gamma} - 2i\gamma e^{2i\gamma}) \\
E_2 &= -1 + e^{2i\gamma} + \frac{\varepsilon}{9} (2 - 10i\gamma - 2e^{2i\gamma} - 4i\gamma e^{2i\gamma}) \\
E_3 &= -1 + e^{2i\gamma} + \frac{\varepsilon}{9} (-1 + 2i\gamma + e^{2i\gamma} - 4i\gamma e^{2i\gamma}) \\
E_4 &= 2 + e^{2i\gamma} + \frac{2\varepsilon}{9} (-2 - 2i\gamma + 2e^{2i\gamma} - 2i\gamma e^{2i\gamma}).
\end{aligned}$$

On peut vérifier que lorsque $\varepsilon = 0$, on obtient la même matrice de transfert qu'en 2.8. Pour faire une analyse de l'équipartition et de la relation de phase entre les trois sorties du dispositif non-idéal, on applique la matrice de transfert sur deux classes de vecteurs d'entrée : une puissance unitaire dans une branche et des signaux déphasés de ϕ dans deux branches. La matrice 2.23 étant de faible symétrie, il faut maintenant traiter trois cas pour chaque classe de vecteurs. Les vecteurs de puissance unitaire dans une branche s'écrivent

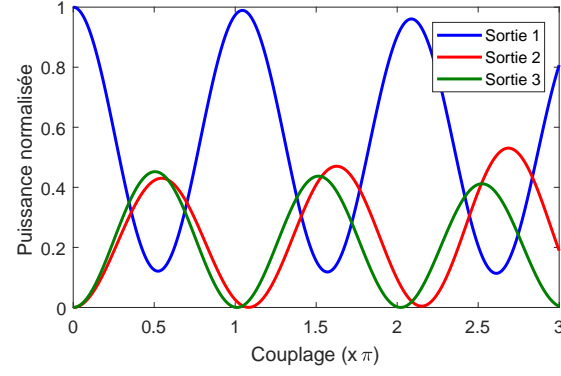
$$t_{P1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, t_{P2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, t_{P3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

La figure 2.5 présente la puissance dans les trois branches de sortie pour chacun de ces trois vecteurs d'entrée. On remarque que plus le paramètre γ est élevé, moins bonne est l'équipartition des puissances lorsque le signal est envoyé dans l'une ou l'autre des entrées associées à la perturbation. Par contre, les courbes sont superposées à celle du cas idéal pour une injection dans la troisième entrée. Ainsi, il faut retenir que plus le dispositif est étiré, c'est-à-dire pour un plus grand nombre de battements, plus la tolérance sur l'équipartition est rigide. Il est donc avantageux de cesser l'étirement au premier croisement des signaux.

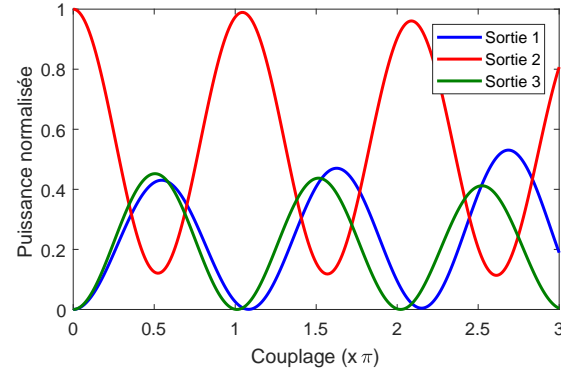
L'impact de l'asymétrie sur les phases relatives est estimé en appliquant la matrice de transfert perturbée sur un vecteur décrivant des signaux d'entrée déphasés de ϕ dans deux branches. Encore une fois, la faible symétrie demande l'étude de trois cas possibles représentés par les vecteurs d'entrée

$$t_{ph1} = \begin{bmatrix} A_S e^{\frac{i\phi}{2}} \\ A_R e^{\frac{-i\phi}{2}} \\ 0 \end{bmatrix}, t_{ph2} = \begin{bmatrix} 0 \\ A_S e^{\frac{i\phi}{2}} \\ A_R e^{\frac{-i\phi}{2}} \end{bmatrix}, t_{ph3} = \begin{bmatrix} A_R e^{\frac{-i\phi}{2}} \\ 0 \\ A_S e^{\frac{i\phi}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

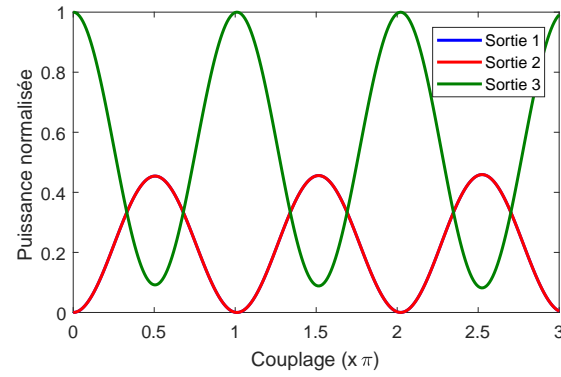
Pour simplifier les calculs, le signal et la référence sont injectés avec la même amplitude



(a)



(b)



(c)

Figure 2.5 Puissances dans les trois branches de sortie en fonction de γ pour un signal unitaire injecté dans l'entrée 1, 2 et 3, montrées en (a), (b) et (c) respectivement. La perturbation normalisée est de $\varepsilon = 0,1$.

unitaire : $A_S = A_R = 1$. On substitue par la suite γ par $\pi/3$, soit la première valeur trouvée précédemment pour l'équipartition des puissances dans le cas idéal et qui s'applique également pour le cas perturbé. La figure 2.6 présente les résultats de calculs en transmission et en phase associés aux vecteurs t_{ph1} , t_{ph2} et t_{ph3} , pour $\varepsilon = 0,1$. On remarque que le résultat est différent pour chaque paire de branches d'entrée. Lorsque le signal et la référence sont envoyés dans les deux branches présentant les perturbations de couplage, l'amplitude aux trois sorties n'est pas affectée par la perturbation et les phases ne le sont que très peu. Par contre, dans les deux autres cas, on observe une différence d'amplitude et une plus grande déviation des phases.

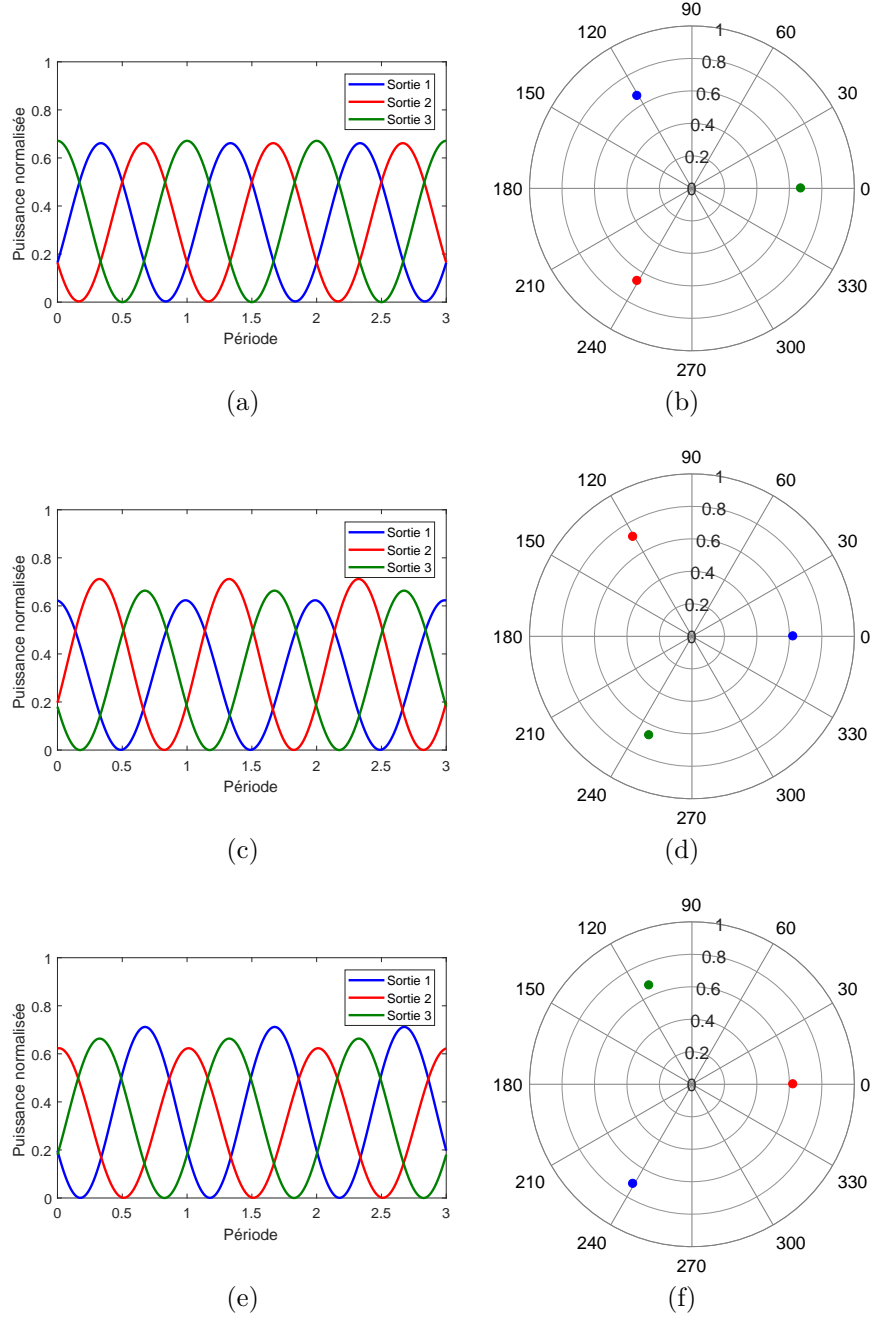


Figure 2.6 Battements en sortie (a, c et e) et représentation polaire du signal (b, d et f) lorsqu'un signal et une référence déphasés de ϕ sont injectés dans deux entrées différentes du coupleur 3×3 ayant une perturbation normalisée $\varepsilon = 0,1$. L'injection est décrite par le vecteur t_{ph1} , t_{ph2} et t_{ph3} sur la première, deuxième et troisième ligne respectivement.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

3.1 Fabrication

À l'instar des coupleurs 2×2 , la fabrication des coupleurs 3×3 se fait à l'aide d'un montage de fusion-étirage tel que celui présenté à la figure 3.1. Les fibres sont solidement installées sur des blocs latéraux avec des clapets aimantés. L'étape de fusion classique consiste en un balayage au-dessus des fibres à l'aide d'une première flamme chaude à base de propane jusqu'à leur fusion. Le temps de balayage détermine le degré de fusion des fibres. Celui-ci est quantifiable par une valeur allant de 0 à 1, où 0 est l'absence de fusion, et 1 une fusion complète des fibres dont la structure transversale est un cercle et les coeurs légèrement rapprochés. L'équation 3.1, développée par Gonthier (1993), permet d'estimer le degré de fusion d'une structure équilatérale à partir du rayon de la gaine optique, ρ_{go} et de la distance d entre deux coeurs.

$$D_f = \frac{2\rho_{go} - d}{(\sqrt{3} - 1)\rho_{go}} \quad (3.1)$$

La figure 3.2 présente différents degrés de fusion que l'on peut obtenir après l'étape de fusion. Des sections droites de trois fibres fusionnées sont présentées. Sur ces quatres sections, on montre respectivement un degré de fusion nul, des degrés de fusion aux alentours de 0,25 et 0,75 respectivement et un degré de fusion de 1. Lors de la fabrication des coupleurs 3×3 , on recherche un degré de fusion plutôt fort, au-delà de 0,58, afin de faire disparaître le trou d'air dans la structure (Pone, 2005).

Une fois les fibres fusionnées, une seconde flamme, juste assez chaude pour les ramollir, balaie de nouveau les fibres pendant que les blocs les étirent à une vitesse de $100 \mu\text{m/s}$ jusqu'à l'observation du couplage voulu entre les fibres à la longueur d'onde d'intérêt.

3.1.1 Contrôle de la géométrie

L'élément crucial de l'étape de fusion est le maintien de la géométrie des fibres lors du passage de la flamme. Les blocs latéraux utilisés sur le montage sont usinés au micron près, de sorte à ce que les fibres soient coincées et bien tendues dans une configuration en triangle équilatéral. La figure 3.3 présente une vue transversale du bloc conçu pour contraindre les fibres dans la configuration voulue. Comme il a été démontré dans la section théorie, la géométrie symétrique est nécessaire à la fabrication des hybrides optiques 120° pour que la phase relative entre les trois branches soit celle désirée et que le transfert du signal soit égal dans les

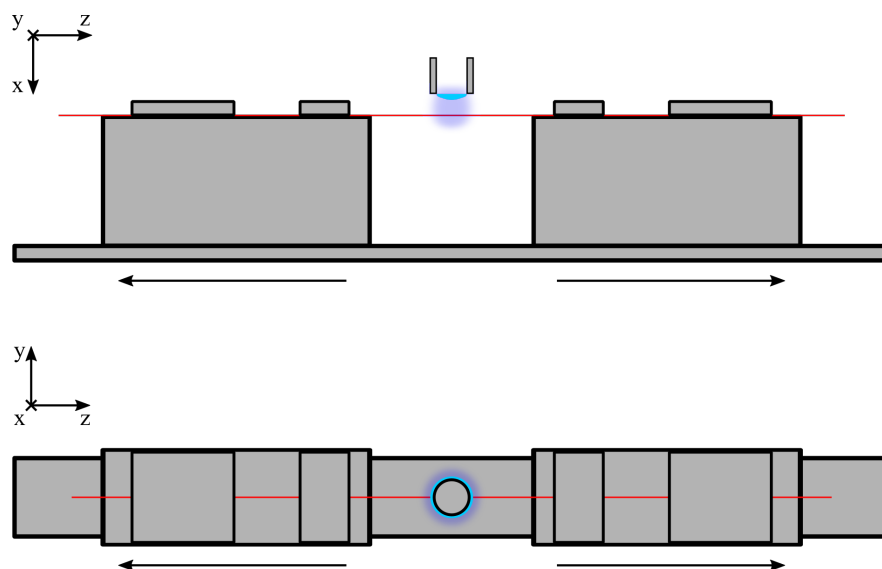


Figure 3.1 Montage de fusion-étirage en vue de face (figure du haut) et de haut (figure du bas). Deux blocs montés sur des platines motorisées contiennent des pinces pour tenir les fibres en place. Une micro-torche est montée sur une platine trois axes (non montrée).

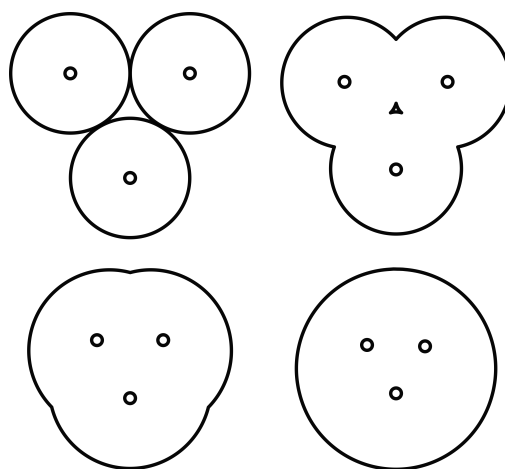


Figure 3.2 Section droite d'un coupleur 3×3 fusionné à différents degrés de fusion. Dans l'ordre, les degrés de fusion sont de 0, environ 0,25 et 0,75, le dernier de 1.

trois branches de sortie, peu importe la branche d'entrée. Le calcul de tolérance indique qu'une asymétrie causant une différence de 10% sur les coefficients de couplage détériore les performances de l'hybride optique en-deça du niveau escompté.

Expérimentalement, il est difficile de déterminer précisément le degré de fusion ou de vérifier directement la géométrie de la structure sans la détruire. Ainsi, plusieurs tests destructifs sont faits pour chaque modification de procédé de fabrication afin d'estimer le taux de succès de fabrication des structures équilatérales. La figure 3.4 présente deux exemples de structures observées au microscope lors des tests destructifs. En a), la structure est manifestement trop asymétrique pour former un hybride, l'essai est raté. Par contre, l'image b) présente la structure recherchée.

Les travaux précédemment effectués sur les hybrides optiques 120° au Laboratoire des fibres optiques ont présenté un très faible rendement de production, de l'ordre d'un hybride fonctionnel et caractérisable sur plus d'une centaine d'essais (Madore, 2012; Khettal, 2014). Un des objectifs de ce projet est de trouver une méthode de fabrication répétable pour les hybrides optiques 120° . Dans ces deux travaux, l'adiabaticité des transitions a été étudiée en détail. Les pertes observées dans les hybrides fabriqués proviennent d'autres sources de défauts que le non-respect du critère d'adiabaticité. Dans le présent travail, l'attention a plutôt été mise sur le contrôle de la géométrie équilatérale des coupleurs 3×3 . Le contrôle de la structure physique de façon répétable s'avère être le défi principal pour la fabrication de bons hybrides. Il est attendu qu'un tel contrôle résultera en bonnes performances au niveau des pertes.

Plusieurs approches ont été testées pour l'étape de fusion. Ces approches sont : omettre la fusion et passer directement à l'étirage, installer les fibres en faisant des torsions, et fusionner en balayant la flamme versus un seul passage de flamme. Le tableau 3.1 résume les recettes de flamme les plus utilisées lors de la fabrication des composants.

Tableau 3.1 Conditions d'utilisation des flammes

	Propane (SCCM)	Distance (mm)
Fusion un passage (chaude)	9–10	0,8–1,5
Fusion par balayage (froide)	6–8	1,2–1,7
Étirage	2–4	1–2

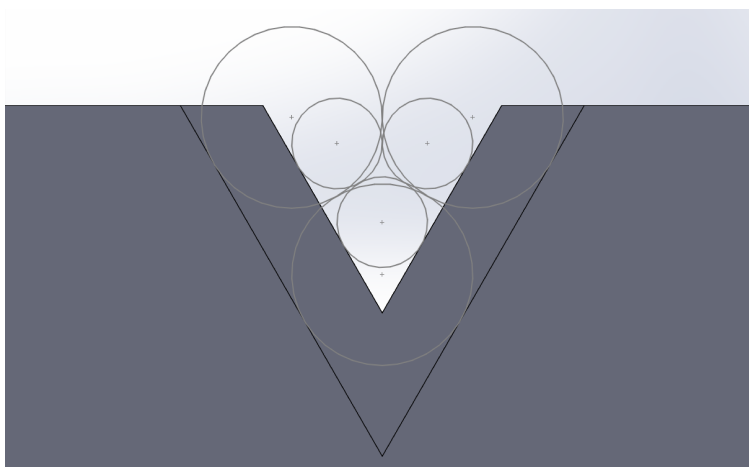


Figure 3.3 Vue transverse du bloc sur lequel sont installées les fibres pour la fabrication des coupleurs 3×3 en configuration équilatérale. Les petits cercles représentent les fibres de silice placées en contact par une rainure triangulaire à proximité de la zone chauffée entre les blocs. Les grands cercles représentent les fibres avec leur gaine protectrice de polymère, placées en triangle dans une seconde rainure se trouvant plus loin sur le bloc. Les deux rainures sont conçues de sorte que les centres des triangles coïncident.

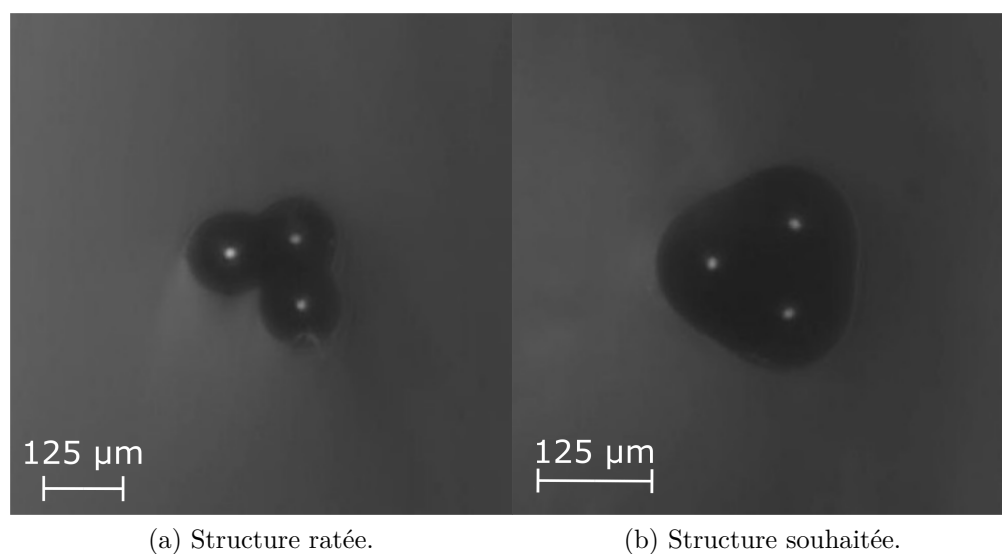


Figure 3.4 Exemples de coupes transverses de structures fusionnées de coupleurs 3×3 . Une structure ratée (a) est trop asymétrique pour former un hybride optique. La structure souhaitée (b) est obtenue après un essai réussi. Le test étant destructif, ces structures clivées ne peuvent servir à former un hybride optique.

Sans fusion

La première approche, soit un étirage sans fusion, consiste à balayer une flamme très froide sur les fibres non fusionnées et de les étirer jusqu'à ce qu'il y ait couplage entre elles. L'objectif de cette méthode de fabrication consiste à minimiser les perturbations dues à la température d'une flamme encore plus chaude et aux hauts débits de gaz associés, qui soufflent sur la fibre. Cette approche a rapidement été abandonnée pour deux raisons. La première est que cette approche fabrique des composants ayant de très faibles degrés de fusion, ce qui peut ajouter des pertes dépendantes en polarisation, ou PDL. Selon Wu and Ou (2003) et Wu and Ou (2004), les pertes dépendantes en polarisation commencent à être négligeables lorsque les coupleurs ont un degré de fusion plus élevé que 0,95. Leur définition du degré de fusion est différente de l'équation exprimée en 3.1 et est donnée par l'équation 3.2, reprenant les mêmes paramètres que pour 3.1.

$$D_f = \frac{d}{2\rho_{go}} \quad (3.2)$$

En faisant une conversion vers la définition 3.1, cela équivaut à dire que le degré de fusion devrait être supérieur à 0,14. Lorsque l'étirage est fait sans fusion, le degré de fusion reste en dessous de cette valeur. La seconde raison d'abandon de cette approche est que la structure équilatérale est difficilement atteinte. La flamme utilisée est suffisamment chaude pour perturber l'environnement autour des fibres, mais trop froide pour les coller rapidement les unes aux autres dans la configuration voulue.

Torsions

La seconde approche testée pour le contrôle de la structure est l'ajout de torsions à l'installation des fibres. Cette méthode est bien connue dans la fabrication des coupleurs 2×2 et aussi utilisée par certaines équipes de recherche pour la fabrication de coupleurs 3×3 (Davis et al., 1986; Birks, 1992; Jung et al., 2013; Chen et al., 2018). La présence de torsions pour les 3×3 sert à garder les fibres bien collées les unes contre les autres en conformation équilatérale. De plus, cette méthode était déjà maîtrisée au LFO pour la fabrication des coupleurs 2×2 et demandait donc peu d'ajustement expérimental pour les 3×3 . Ainsi, pour la fabrication des coupleurs 3×3 , l'utilisation des torsions consiste à faire un tiers de tour avec les fibres aux deux extrémités près des blocs d'étirage et de fusionner entre ces torsions. Ces torsions doivent être suffisamment éloignées l'une de l'autre pour laisser de l'espace pour la fusion et un peu plus pour que la flamme puisse approcher les fibres sans les perturber. Les sections avec torsions sont celles dont le comportement est le moins prévisible à l'approche de la

flamme étant donné les contraintes particulières associées. L'expérimentateur a un impact non négligeable sur la réussite de cette technique, car elle requiert beaucoup de minutie et de patience.

Une nouvelle technique jamais recensé dans la littérature de *préforme* a été introduite pour augmenter l'efficacité des torsions. La préforme consiste en un étirage avec un profil longitudinal convexe favorisant le contact des fibres au centre des sections torsadées. L'objectif principal de la préforme est de stabiliser les torsions à des endroits bien précis, afin qu'elles restent toujours à cet endroit lors de l'étape de fusion. Le profil cible est présenté à la figure 3.5, ainsi que quelques comparaisons avec des profils fabriqués expérimentalement à partir de la recette générée par le programme MATLAB. Les essais 1 et 2 ont été fabriqués sur des fibres individuelles, les essais 3 et 4 sur des paires de fibres et l'essai 5 sur un trio de fibres, dont l'une d'entre elle a brisé avant la caractérisation. Dans tous les cas, le profil général est tel que souhaité, mais un peu plus étendu que prévu, ce qui ne cause pas de problème pour l'objectif visé. Cependant, on peut également remarquer un défaut très localisé sur certains profils. Ce défaut peut être plus problématique lors de la manipulation ou l'étirage des fibres, car il peut plus facilement être sujet à l'accumulation de contraintes. Plus de tests à une, deux ou trois fibres auraient été nécessaires pour déterminer la proportion d'échantillons qui contiennent ce défaut. De plus, une caractérisation plus fine des échantillons aurait permis de déterminer exactement sa taille et profondeur. Cependant, les tests n'ont pas été poursuivis puisque les dispositifs fabriqués suite à l'utilisation de la préforme cassaient près des torsions lors de l'étirage. Les contraintes locales des fibres au niveau des creux de la préforme étaient trop importantes pour supporter la tension appliquée sur les fibres, et ce, même lorsque celles-ci étaient à une température plus élevée, donc avec une plus basse viscosité dans la région d'étirage.

Fusion par balayage versus un passage

La troisième approche implique le style de fusion utilisé, soit une fusion conventionnelle par balayage ou une fusion chaude en un passage. La fusion conventionnelle est la méthode standard utilisée au LFO jusqu'à présent. Elle consiste à balayer la flamme sur les fibres en contact sur une distance de balayage de 3–8 mm durant quelques minutes, typiquement avec une flamme plus chaude que celle utilisée à l'étirage. La recette de référence, couramment utilisée pour les composants 2×2 , consiste à approcher progressivement une flamme chaude d'une distance de 3,5 à 1,5 mm. Le procédé dure plusieurs dizaines de secondes, la durée exacte dépendant du degré de fusion recherché, mais tournant autour de 50 à 90 secondes.

La fusion chaude en un passage est nouvellement utilisée. Il s'agit d'utiliser une flamme très

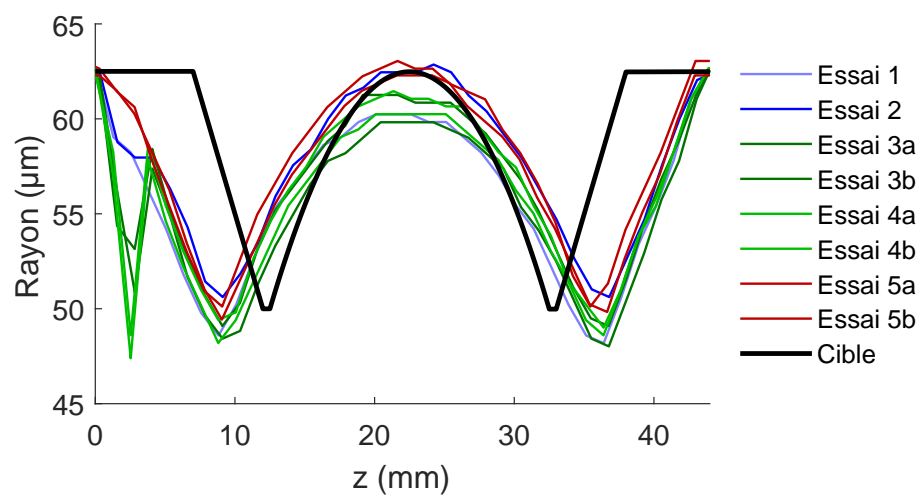


Figure 3.5 Profil longitudinal de préforme des fibres effectuée afin de favoriser la fusion de structures torsadées.

chaude et de la faire passer rapidement (1 mm/s) une seule fois au-dessus des fibres dégainées. La température doit être assez élevée pour que les fibres fusionnent instantanément lors du passage de la flamme. Le processus ne dure qu'une dizaine de secondes, la durée exacte dépendant de la longueur de fusion désirée. Le degré de fusion est contrôlé ici par la chaleur de la flamme, contrôlée par la proportion des différents gaz, et par sa distance aux fibres. Une des difficultés de la fusion à un passage est qu'il est difficile d'assurer l'adiabaticité des composants. La flamme utilisée est tellement chaude que les zones de transition peut facilement être trop abrupte. Ce problème est évité par une approche graduelle de la flamme aux fibres. La figure 3.6 résume le parcours suivi par la torche afin de favoriser des zones de transition plus douces. Les paramètres h_f et Δh représentent la hauteur de fusion de la flamme par rapport aux fibres et la différence entre h_f et la hauteur initiale ou finale, qui sont égales. Les paramètres z_d , z_f et z_m définissent les distances de descente, de fusion et de montée de la flamme, respectivement. Pour tous les essais faits dans le cadre de ce projet, $z_d = z_m$, mais il est possible de choisir des paramètres différents.

Tableau 3.2 Paramètres de la fusion à un passage.

Fusion	Δh [mm]	z_f [mm]	z_d, z_m [mm]
1	2,5	6	3,125
2	2,5	4	3,125
3	2,0	4	2,5
4	2,4	4	3,0
5	2,3	4	2,875

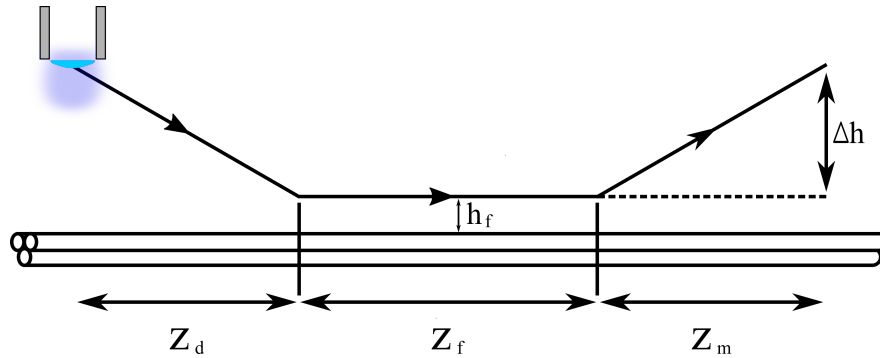


Figure 3.6 Paramètres de la méthode de fusion à un passage.

3.2 Caractérisation

Les principales méthodes de caractérisation utilisées pour le développement et la validation des hybrides optiques sont les suivantes : mesure de transmission en puissance et mesure de battements d'interférence entre deux entrées optiques déphasées.

3.2.1 Transmission

La caractérisation en transmission donne les premières indications sur la qualité des coupleurs 3×3 fabriqués comme hybrides optiques 120° . Les informations directement recueillies par la transmission sont les pertes d'insertion aux trois sorties pour chaque branche d'injection du signal. Les pertes d'insertion sont définies comme étant la proportion du signal à une sortie par rapport à la proportion du signal à l'entrée et sont représentées en décibels ou en pourcentages. À partir des pertes d'insertion, on peut calculer les pertes d'excès, les taux de branchement, la longueur d'onde de croisement et le ratio de couplage. Les pertes d'excès se calculent comme

$$\xi_E[dB] = -10 \log_{10} \left[1 - \left(10^{\frac{-P_{S1}[dB]}{10}} + 10^{\frac{-P_{S2}[dB]}{10}} + 10^{\frac{-P_{S3}[dB]}{10}} \right) \right] \quad (3.3)$$

où P_{Si} est la puissance à la sortie de la branche i ($i = 1, 2, 3$) du dispositif. Le taux de branchement T_{br} est défini comme

$$T_{br,i} = \frac{P_{Si}}{P_{S1} + P_{S2} + P_{S3}}, i = 1, 2, 3. \quad (3.4)$$

La longueur d'onde de croisement est définie comme la longueur d'onde à laquelle on obtient l'équipartition des signaux. Le ratio de couplage est le pourcentage de puissance transférée dans chaque branche à la longueur d'onde de couplage, sans tenir compte des pertes du dispositif.

La caractérisation en transmission des coupleurs 3×3 se fait durant la fabrication des dispositifs à l'aide d'une source large bande allant de 1300 nm à 1600 nm et d'un analyseur de spectre optique, ou OSA. Il y a une étape préliminaire de calibration du signal, avant l'étape de fusion, qui consiste à insérer les trois branches de sortie à un commutateur optique 3×1 , permettant de choisir n'importe quelle branche de sortie à observer sur l'OSA. La source est injectée tour à tour dans chaque entrée et les zéros sont enregistrés pour chaque sortie afin de tenir compte des pertes initiales. Il est ensuite possible d'observer en temps réel le transfert du signal de la branche d'entrée vers les branches de sortie. La recette est arrêtée lorsqu'environ le tiers du signal d'entrée, équivalent à 4,78 dB, est transmis dans chacune des branches

de sortie. Par la suite, la transmission est testée pour les deux autres branches d'entrée afin de confirmer l'équipartition des puissances pour toutes les entrées. Si c'est le cas, et que le composant a été fabriqué de manière adiabatique, celui-ci devrait théoriquement présenter le comportement en phase décrit par l'équation 2.16. Le composant est alors conditionné pour la caractérisation en phase qui se fait hors du montage de fabrication.

3.2.2 Phase

La caractérisation en phase se fait à l'aide du montage présenté à la figure 3.7, utilisé pour la première fois au Laboratoire des fibres optiques par (Madore et al., 2010). Un laser accordable dans les longueurs d'onde de la bande C, entre 1525 et 1575 nm, est utilisé pour la caractérisation. Un coupleur 2×2 est utilisé pour séparer le signal en deux : un signal de référence et un modulé. Le coupleur a été fabriqué afin de séparer le signal selon un ratio de 40:60 à 1550 nm. La sortie à 60% est envoyée dans le modulateur acousto-optique, qui comporte en soi des pertes d'insertion d'environ 2,2 dB, pour un total de 4,2 dB de pertes par rapport au signal d'entrée dans le montage pour ce parcours. Le modulateur acousto-optique décale le signal en fréquence de 25 MHz par rapport au signal de référence, modulant linéairement la phase avec le temps.

Le signal de référence est envoyé dans un contrôleur de polarisation fibré, aussi appelé boucles de Lefevre, constitué de trois boucles autour desquelles les fibres sont enroulées. Le rayon de ces boucles et le nombre d'enroulement des fibres sont tels que la première et la dernière agissent comme lames quart d'onde et celle du centre comme lame demi-onde (Lefevre, 1980). Ces boucles peuvent être bougées séparément, relativement au même axe, permettant d'ajuster la polarisation afin de mimer le plus possible celle sortant du modulateur acousto-optique et de maximiser la visibilité des franges interférométriques du signal sortant de l'hybride caractérisé. Les pertes associées à ce parcours sont près de 4 dB, approchant celles du signal modulé et assurant un bon contraste lors de la lecture du signal.

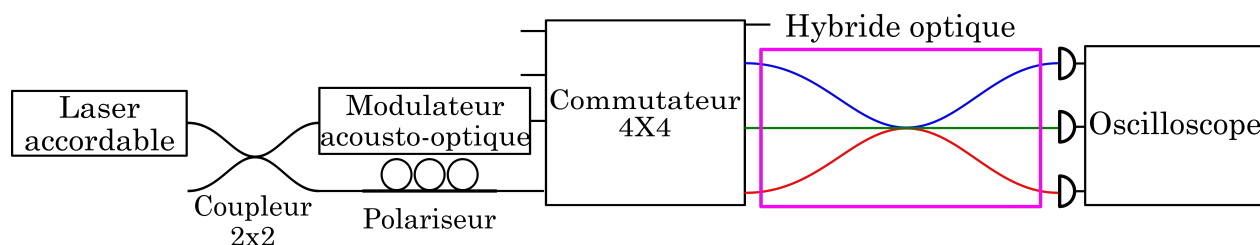


Figure 3.7 Montage de caractérisation en phase des coupleurs 3×3 , modifié de Madore (2012).

Le signal de référence et le signal modulés sont ensuite envoyés dans un commutateur à quatre ports d'entrée et quatre ports de sortie. Ce commutateur 4×4 permet de tester toutes les paires d'entrées possibles dans l'hybride optique. Dans le cas d'un hybride optique en coupleur 3×3 , seules 3 paires d'entrées différentes doivent être testées pour caractériser entièrement le composant. Chaque sortie du composant est reliée à un détecteur qui transforme le signal optique en signal électrique et l'envoie à un oscilloscope, qui affiche simultanément les trois signaux sortant. Le signal attendu sur l'oscilloscope, pour un déphasage linéaire, est celui décrit par l'équation 2.18, sauf qu'au lieu d'être en fonction du déphasage ϕ , la transmission obtenue est en fonction du temps. L'oscilloscope mesure donc des délais, qui peuvent être par la suite convertis en déphasage. Le résultat est ensuite analysé par la méthode des moindres carrés à l'aide de MATLAB où on retire l'information sur l'amplitude et la phase par un ajustement sinusoïdal.

Un aspect important du montage de caractérisation en phase est que tous les chemins optiques allant du coupleur 2×2 à l'hybride optique sous test doivent être sensiblement égaux. Une différence de chemin d'un millimètre est tolérable, mais une différence de plusieurs centimètres résulte en une perte de visibilité due à la longueur de cohérence limitée de la source. À chaque installation d'un nouvel hybride à tester, les longueurs de fibres sortant du composant conditionné sont égalisées au millimètre près. Le montage a été assemblé avec des longueurs de fibres égalisées au millimètre près dans la zone critique d'interférence. Les longueurs de fibres en sortie du composant sous test jusqu'aux détecteurs sont également égalisées afin d'éviter des délais temporels à l'oscilloscope. Il a été observé que le commutateur 4×4 électro-mécanique induit des délais variables dépendant des paires entrée-sortie utilisées. Ces délais ont été caractérisés afin de guider un choix judicieux de ports utilisés.

Dans le cas d'une excitation idéale telle qu'on envoie la même amplitude dans deux branches d'injection, le comportement attendu est une équipartition des puissances et des déphasages de $0, 120$ et 240° entre les sorties, comme dans la représentation théorique de la figure 2.3. L'amplitude et le déphasage sont extraits numériquement à partir des données obtenues et sont représentées sur un graphique polaire, comme à la figure 2.4, où l'amplitude est représentée par le rayon et la phase par l'angle. Un composant de bonne qualité devrait avoir une erreur sur la phase attendue de $\leq \pm 10^\circ$.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSES

Environ 200 essais de fabrication ont été effectués au Laboratoire des fibres optiques dans le cadre de cette recherche, toutes méthodes de fabrication confondues. La majorité des résultats recueillis comprennent la courbe de transmission des composants, mais dans certains cas, ils se résument à des observations expérimentales. Seuls les composants présentant une répartition des puissances pour une longueur d'onde de la bande C ont été testés en phase. Malheureusement, plusieurs composants réussis à cette étape ont été endommagés dans différentes étapes de fabrication, d'emballage ou de caractérisation, les rendant partiellement ou totalement inutilisables.

4.1 Sans fusion

Seulement 5 à 6 essais ont été effectués pour fabriquer des coupleurs 3×3 avec la méthode d'étirage sans fusion, mais tous présentent des performances en transmission similaires à ce qu'on retrouve à la figure 4.1. Dans tous les cas, l'équipartition des puissances des trois sorties n'est pas observée. Il est particulièrement difficile d'estimer la proportion d'essais donnant la bonne géométrie avec cette méthode étant donné que les fibres ne sont que très peu ou pas fusionnées. Les tests destructifs ont pour effet de décoller les fibres et donc de les déplacer, rendant la géométrie fabriquée non observable.

Toujours sur la figure 4.1, on remarque des oscillations du signal aux deux sorties de couplage. Ces oscillations peuvent possiblement s'expliquer par la présence du trou d'air qui est toujours présent même lorsque les fibres sont suffisamment petites et les coeurs suffisamment proches pour coupler. Le champ peut être perturbé par la présence de cet espace entre les trois fibres.

Finalement, les pertes d'excès du coupleur présenté à la figure 4.1 sont très basses et vont même dans le positif. Une mauvaise calibration initiale, où les paramètres étaient ceux du composant précédent, est à l'origine de cette sous-estimation des pertes. Les profils des courbes sont toutefois fiables puisque toutes les transmissions ont été enregistrées dans les mêmes conditions.

4.2 Fusion par balayage avec torsions

Il a été mentionné précédemment que deux techniques avaient été utilisées pour l'approche de fabrication avec torsions : avec et sans préforme. Dans les deux cas, toutes les fusions ont été faites par balayage.

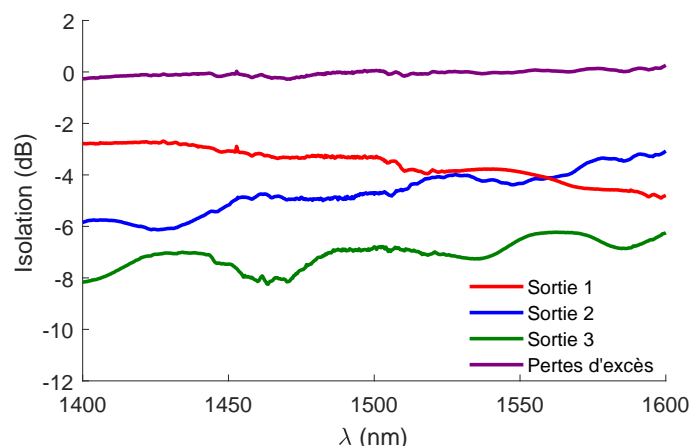
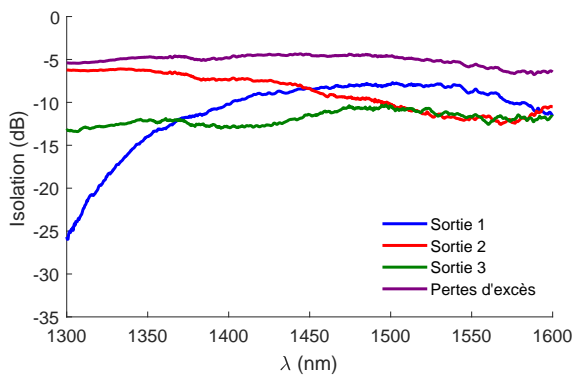


Figure 4.1 Transmission d'un coupleur fabriqué par l'approche sans fusion.

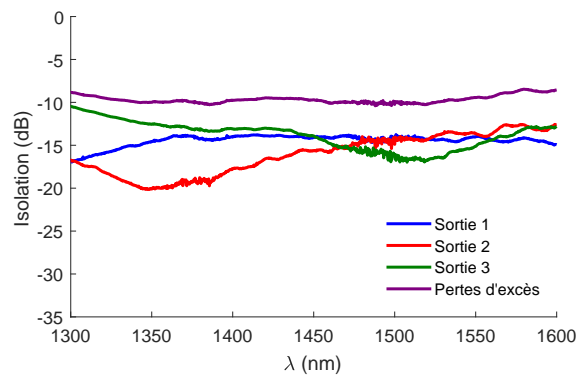
La méthode sans préforme n'a été que très légèrement concluante en ce qui concerne la caractérisation en géométrie et en transmission des composants. Environ une vingtaine d'essais n'ont pas pu être caractérisés à cause du bris des fibres dans la région des torsions. Parmi les essais caractérisés en géométrie, un tiers des essais destructifs, soit 12 sur 36, ont présenté une configuration équilatérale. Parmi les coupleurs caractérisés en transmission, seuls trois candidats ont présenté un semblant d'équipartition, couplé avec des pertes d'excès beaucoup trop élevées. Ces résultats sont présentés à la figure 4.2. Le meilleur dispositif montré en 4.2a a des pertes d'excès aux alentours de 5 dB, c'est-à-dire que 61,8% du signal initial est perdu. Les deux autres coupleurs ont des pertes plus grandes encore, soit environ 9 dB ou 87,4% pour 4.2b et environ 12,5 dB ou 94,4% pour 4.2c. Puisqu'on cherche à faire des composants de bonne qualité, des pertes aussi élevées sont inacceptables.

Certaines observations qualitatives ont été faites lors de la fabrication des dispositifs avec la méthode de fusion par balayage sur les coupleurs avec torsion. Il a été remarqué que les torsions bougent souvent, parfois se resserrant et d'autres fois se desserrant, ce qui nuit à la répétabilité des résultats. Ces observations ont mené à l'invention de la technique de fusion avec préforme, l'objectif étant de forcer les torsions à rester au même endroit, sans bouger, tout au long de la fusion.

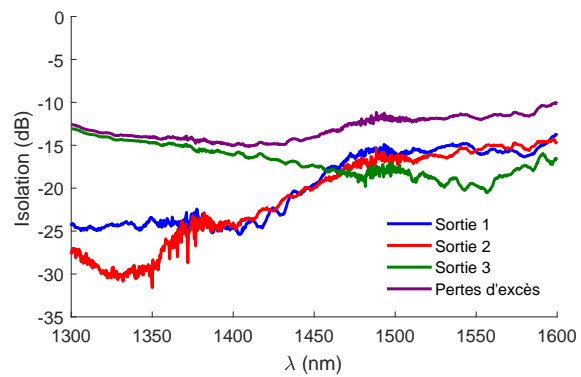
Toutefois, il a été plutôt ardu de récolter des données par l'approche avec préforme à cause du haut taux de bris, encore plus élevé que pour les essais sans préforme. Les fibres cassent, soit au mauvais endroit lors du test destructif de détermination de la géométrie, ou bien



(a)



(b)



(c)

Figure 4.2 Courbes de transmission de trois coupleurs différents avec la méthode de fusion par balayage et torsions.

au début de l'étape d'étirage lorsqu'on poursuit la fabrication du dispositif. Parmi les essais où la géométrie a pu être observée, seulement un essai sur les 17 caractérisables a montré une géométrie équilatérale. Aucune trace de la transmission n'a pu être prise à cause de la localisation des contraintes dans les régions amincies de la préforme, provoquant la cission des fibres au début de l'étape d'étirage à chaque tentative. Malgré tout, des observations en temps réel ont été faites lors de la fusion des fibres et il y avait présence de pertes d'insertion de 9 à 20 dB, ou 87,4 à 99,0%, lors de la fusion des fibres, ce qui est beaucoup trop élevé.

L'allure de la structure au microscope montre également que la région centrale des composants est plus large que les sections latérales, comme observé à la figure 4.3. Cette diminution locale de la taille des fibres est corrélée à la présence de la préforme. Le rôle principal de la préforme est de contraindre les torsions à des endroits particuliers sur les fibres et on observe, à partir de la figure 4.3, que le but n'est pas atteint. Les torsions semblent absentes, alors qu'elles sont simplement déplacées hors du champ de vue du microscope, n'étant aucunement retenues par la préforme. Suite à ces résultats, l'utilisation de la préforme pour contraindre et stabiliser les torsions lors de la fusion a été abandonnée, ainsi que la présence des torsions tout court.

4.3 Fusion par balayage sans torsions

À la figure 4.4 sont présentées les pertes d'excès des tests de fusion par balayage sans torsions menés jusqu'à un certain couplage dans les deux autres fibres. Chaque courbe de la figure correspond à la moyenne des pertes d'excès d'un dispositif calculées à partir des transmissions associées à chaque branche d'injection. Le couplage n'est pas répétable avec cette méthode même si tous les coupleurs sont fabriqués avec la même flamme et la même recette, d'une durée totale de 195 secondes, incluant la fusion et l'étirage. Contrairement à l'approche avec torsions, il est possible d'obtenir avec cette technique des pertes d'excès aussi basses que 0,2 dB, mais allant tout de même jusqu'à 3 dB dans les pires cas. On remarque sur la figure 4.4 qu'il y a un creux près de 1385 nm associé au pic d'absorption des ions OH^- . Le creux est caractéristique de la fusion par balayage, car étant plus longue, elle laisse le temps aux ions OH^- de diffuser dans la fibre.

Le taux de configurations équilatérales obtenu par les tests destructifs est de 5 sur 20, donc 25% de réussite, ce qu'on considère comme acceptable. Par contre, lorsque la fabrication des dispositifs est poursuivie pour en vérifier les courbes de transmission, aucun des quatorze composants fabriqués n'a montré l'équipartition pour les trois branches d'entrée du signal. Une hypothèse pour expliquer ces résultats est que le test destructif ne montre que la géométrie à un point précis de la région fusionnée, mais que cette géométrie varie tout au long de la section fusionnée. Cette hypothèse est particulièrement probable avec la méthode de

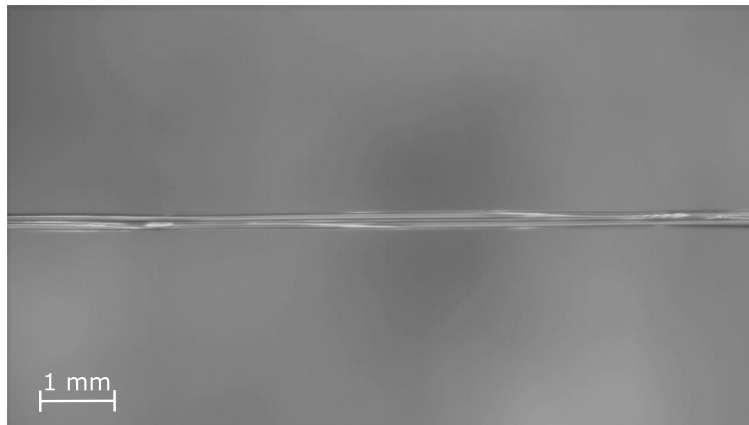


Figure 4.3 Exemple de non homogénéité de la zone chauffée lors de l'étape de fusion avec préforme.

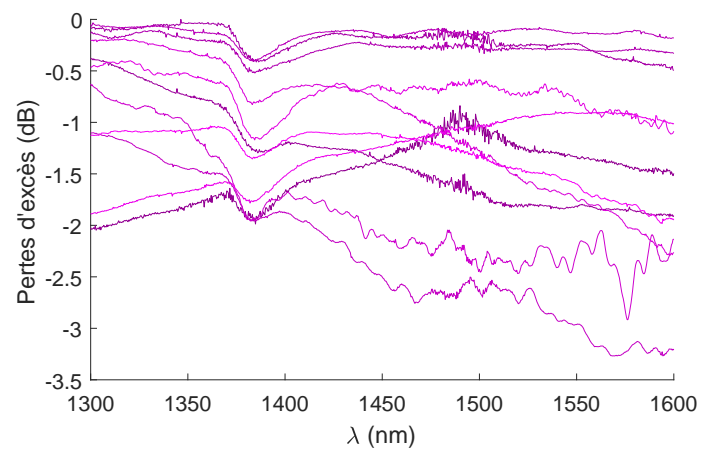


Figure 4.4 Courbes de pertes d'excès pour les coupleurs fabriqués avec la fusion par balayage et sans les torsions.

fusion par balayage étant donné qu'il s'agit d'une fusion lente et que certaines régions de la zone chauffée fusionnent avant les autres. La fusion se fait donc de manière non-homogène même si, une fois la recette terminée, le composant semble fusionné uniformément. C'est à partir de ces résultats que la méthode de fusion en un passage a été explorée, afin de tenter de fusionner uniformément les fibres, en leur donnant un minimum de jeu pour bouger.

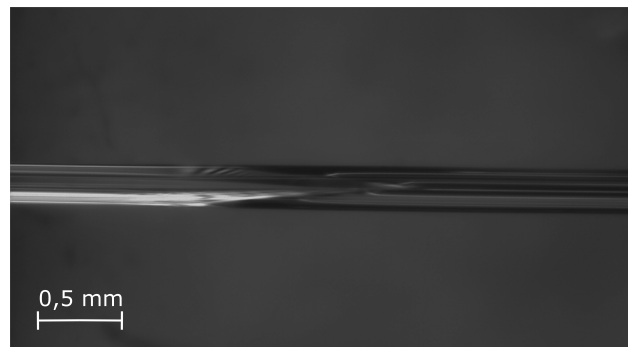
4.4 Fusion en un passage

Les résultats des composants fabriqués à l'aide de la méthode de fusion à un passage sont les plus concluants. Des essais ont été effectués avec et sans torsion. La combinaison avec torsion a été rapidement écartée à cause de la trop grande perturbation que la flamme très chaude applique sur la torsion lors de son approche sur les fibres. En se référant à la figure 3.2 définissant la fusion à un passage, la première torsion se situe typiquement dans la distance z_d associée à la descente de la flamme. L'approche de la flamme cause un important mouvement des fibres et résulte en une fusion imprévisible d'un essai à l'autre, en plus d'une grosse déviation des fibres par rapport à leur axe initial de tension et d'énormes pertes. La fusion à un passage sans torsion présente des résultats plus stables d'un essai à l'autre. L'approche de la flamme dévie aussi les fibres de leur axe de tension, mais nettement moins qu'avec les torsions.

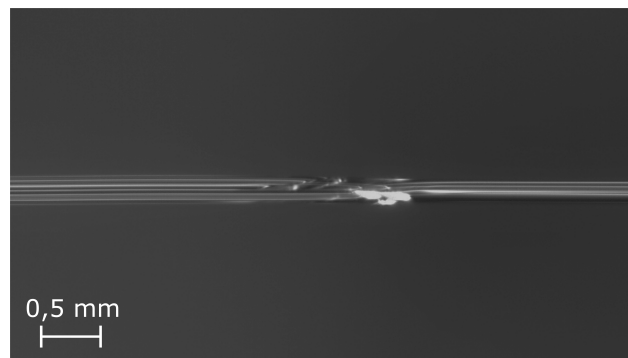
La figure 4.5 présente deux exemples de zones de transitions suite à une fusion à un passage. En 4.5a, la fusion est réussie. La zone de transition est graduelle et uniforme et le test destructif (non montré) présente une géométrie équilatérale. En contrepartie, 4.5b présente l'image d'une fusion caractéristique d'une mauvaise géométrie. Dans la zone de transition, on observe une fusion préférentielle avec l'une des deux fibres du dessus et celle d'en dessous. Ce profil de fusion résulte toujours en une configuration isocèle où la fibre du dessus, qui fusionne en premier avec celle d'en dessous, forme la pointe de ce triangle. Il s'agit de la fibre du haut sur l'image.

Puisque l'un des problèmes soulevés avec la fusion par balayage est le manque d'uniformité, on vérifie d'abord l'uniformité des fusions avec la méthode à un passage. La figure 4.6 présente différents exemples d'uniformité des fusions. Les résultats présentés en 4.6a et en 4.6b sont uniformes entre les deux zones de transition et représentent les résultats les plus communs parmi les tests effectués, qui s'élèvent à un peu plus d'une centaine. Dans ces deux cas, on peut considérer que les géométries sont constantes tout au long de la zone fusionnée.

Pour l'exemple de 4.6c, on voit que la région de gauche ne présente pas les mêmes reflets ni la même zone de transition que celle de droite. Différents phénomènes peuvent être à



(a) Fusion réussie

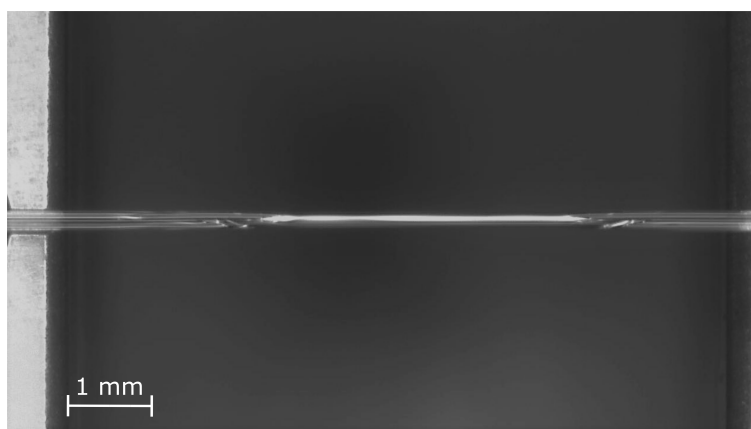


(b) Mauvaise fusion

Figure 4.5 Exemples de fusions associées a) à une géométrie équilatérale des fibres et b) à une géométrie isocèle des fibres



(a)



(b)



(c)

Figure 4.6 Différents exemples d'uniformité des fusions à un passage, pour a) une fusion réussie, b) une fusion uniforme dont la géométrie résultante n'est pas équilatérale et c) une fusion non uniforme dont la section de gauche est équilatérale et non la section de droite.

l'origine de ce changement de configuration. Si les fibres sont mal nettoyées, il peut rester des poussières ou des résidus collés sur l'une ou plusieurs des fibres. Lorsque la flamme survole une région plus sale, une perturbation supplémentaire en température peut se produire et causer un mouvement des fibres. Toutefois, le phénomène le plus probable du changement de configuration est la libération locale de contraintes accumulées. La façon dont les fibres sont installées sur le montage peut introduire des torsions individuelles sur celles-ci (d'une autre nature que les torsions volontaires utilisées précédemment). Il est possible que, lors de la fusion, ces torsions se déplacent jusqu'à un point où elles ne peuvent plus progresser à cause de l'emprisonnement mécanique par laquelle les fibres sont solidement installées d'un bloc d'étirage à l'autre. Sinon, les contraintes provoquant le changement de structure peuvent provenir d'un mauvais alignement du montage. Ainsi, si les blocs d'étirage ne sont pas parfaitement alignés, les fibres peuvent être imperceptiblement courbées vers le haut, vers le bas, sur les côtés ou bien une combinaison de toutes ces situations. Généralement, lorsque plusieurs tests subséquents ne présentent pas une fusion uniforme, le montage requiert un réalignement.

Pour effectuer les fusions à un passage, on a réduit la distance entre les blocs d'étirage par rapport à la fusion par balayage ou avec torsions. La fusion à un passage est très chaude et crée donc beaucoup de perturbations sur les fibres. Ainsi, mieux elles sont contraintes par les blocs, moins elles bougent à l'approche de la flamme et plus les résultats sont reproductibles d'un essai à l'autre. La distance maximale utilisée entre les blocs pour fabriquer les coupleurs 3×3 est de 20 mm dans les premiers essais où la fusion est faite sur 6 mm, puis varie entre 8 et 12 mm pour des fusions sur 4 mm. La distance initiale entre les blocs d'étirage pour les recettes précédentes est plus élevée, variant entre 35 et 47 mm. Il faut cependant faire attention au critère d'adiabaticité lorsqu'on réduit la taille des dispositifs, car ceux-ci peuvent commencer à montrer des pertes importantes.

La figure 4.7 présente le seul coupleur 3×3 de ce groupe exhibant une équipartition des puissances. Les figures 4.7a et 4.7b, montrant un transfert quasi égal du signal des branches d'entrées 1 et 2 respectivement, sont suffisantes pour nous en convaincre. À cause d'un manque de contrôle sur le critère d'arrêt de la recette pour obtenir le croisement à 1550 nm, celui-ci se trouve plutôt aux alentours de 1470 nm. Le laser utilisé sur le montage de caractérisation en phase ne balaie que les longueurs d'onde de la bande C et, de plus, tout le montage de caractérisation en soi est optimisé pour ces longueurs d'onde. Par exemple, la transmission du coupleur 2×2 de la figure 3.7 servant à séparer le signal de la référence est présentée à la figure 4.8. On y observe un creux de transmission pour l'une des deux branches à la longueur d'onde de croisement de l'hybride optique et la quasi totalité du signal est transmis dans l'autre branche. Il est donc impossible, avec les outils accessibles au laboratoire de

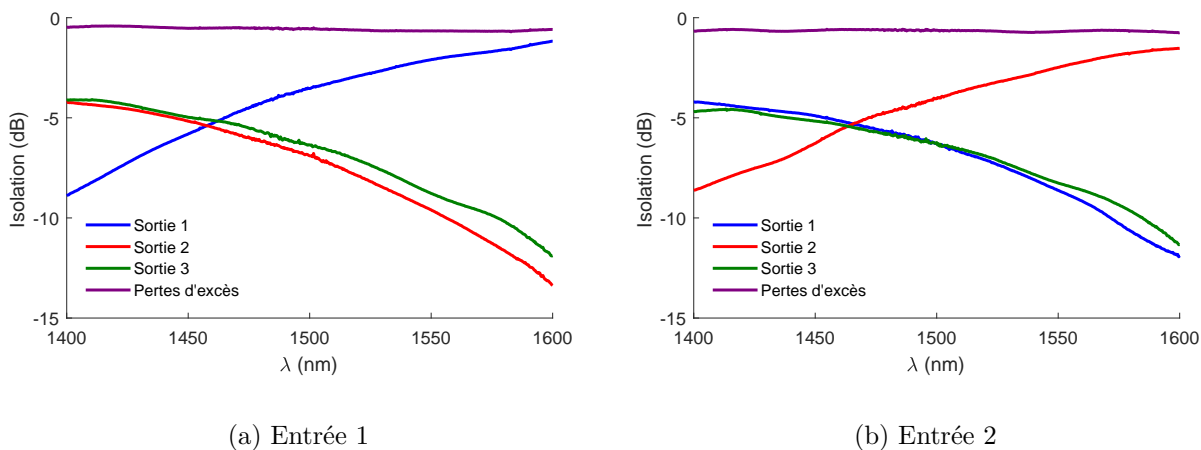


Figure 4.7 Courbes de transmission de l'hybride optique fabriqué avec une fusion à un passage sur 6 mm où l'injection est faite par a) l'entrée 1 et par b) l'entrée 2.

caractériser en phase ce dispositif. Suite à la fabrication de ce composant, la recette a été adaptée afin de pouvoir mieux contrôler la longueur d'onde de croisement.

La proportion de géométries équilatérales pour les fusion à un passage sur 6 mm est de 6 sur 25 essais. Des tests en parallèles ont été effectués avec des fusions à un passage sur 4 mm. Le taux de bonne géométrie pour les fusions sur 4 mm est de 18 sur 45. Les fusions de 6 mm ont donc été abandonnées au profit de celles sur 4 mm. Les différents paramètres d'approche de la flamme présentés au tableau 3.2 révèlent chacun divers avantages et inconvénients qui sont résumés au tableau 4.1, où les pertes d'excès sont présentées en valeurs absolues pour

Tableau 4.1 Résumé des résultats pour les différentes approches de la flamme dans le cas des fusions à un passage sur 4 mm.

Fusion	ξ_E min [dB]	ξ_E max [dB]	ξ_E moy [dB]	Nb équipartition	Nb caract
1	1,39	0,31	0,78	1/4	0
2	2,56	0,06	0,85	0/7	0
3	2,66	0,91	1,65	3/3	0
4	2,88	0,34	1,26	4/8	3
5	2,18	1,41	1,77	1/1	1

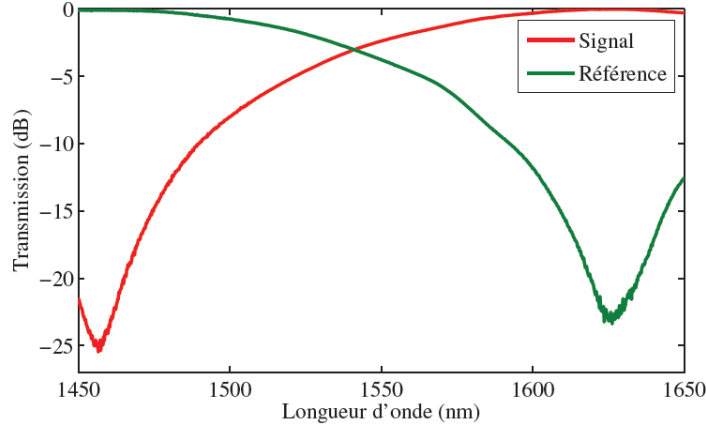
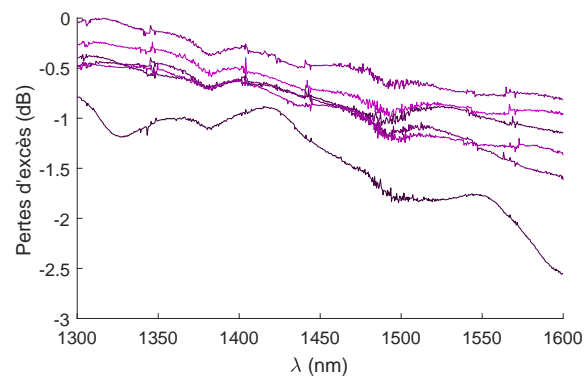


Figure 4.8 Courbe de transmission du coupleur débalancé du montage de caractérisation en phase, tiré de Madore (2012).

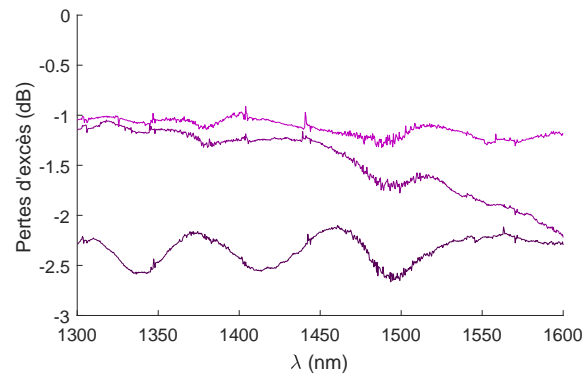
alléger. Pour chaque approche de flamme décrite tableau 3.2, une moyenne des pertes d'excès ξ_E a été calculée. Le tableau 4.1 présente aussi le nombre de composants réussis, c'est-à-dire ceux qui assurent une équipartition des puissances, et le nombre qui a pu être caractérisé en totalité ou en partie pour la phase.

La figure 4.9 présente les pertes d'excès de tous les composants complétés, qu'il y ait équipartition des puissances ou non. Chaque courbe fait référence à un dispositif où les pertes d'excès associées à chaque branche d'injection ont été moyennées. On remarque que dans tous les cas, le signal tend à avoir des pertes plus importantes pour des plus grandes longueurs d'onde. On peut voir également que la fusion 2 a pour avantage de présenter des pertes d'excès moins importantes que les autres approches. La fusion 5 n'apparaît pas sur cette figure, car il n'y a eu qu'un essai, mais les pertes d'excès du composant en question sont de 1,77 dB en moyenne et sont donc également plus élevées que celles de la fusion 2. Le désavantage de cette dernière est qu'aucun des composants fabriqués n'a montré une équipartition des puissances.

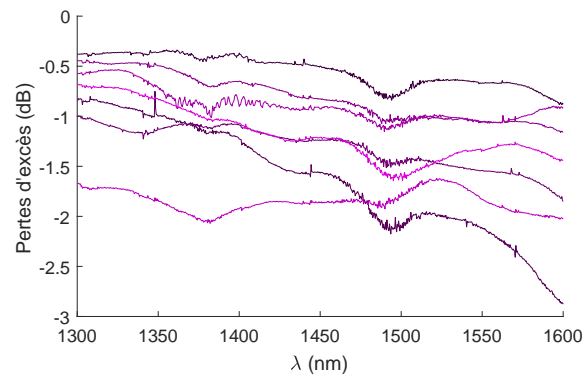
À l'opposé, les trois dispositifs fabriqués par l'approche 3 ont montré une équipartition des puissances, mais les performances étaient entachées par des pertes d'excès en moyenne plus importantes que les autres approches. Il s'agit de la méthode de fusion la plus abrupte et pour laquelle les blocs d'étirage sont les plus rapprochés. Il est donc possible que cette approche produise des composants qui ne sont pas adiabatiques. La figure 4.10 présente les transmissions pour deux branches d'entrée. On remarque de légères oscillations du signal avec la longueur d'onde. Ces oscillations sont présentes sur les courbes de transmission des trois composants fabriqués avec cette approche, ce qui appuie l'hypothèse de non adiabaticité de la technique.



(a) Fusion 2



(b) Fusion 3



(c) Fusion 4

Figure 4.9 Pertes d'excès associées aux différentes approches de flammes décrites au tableau 3.2.

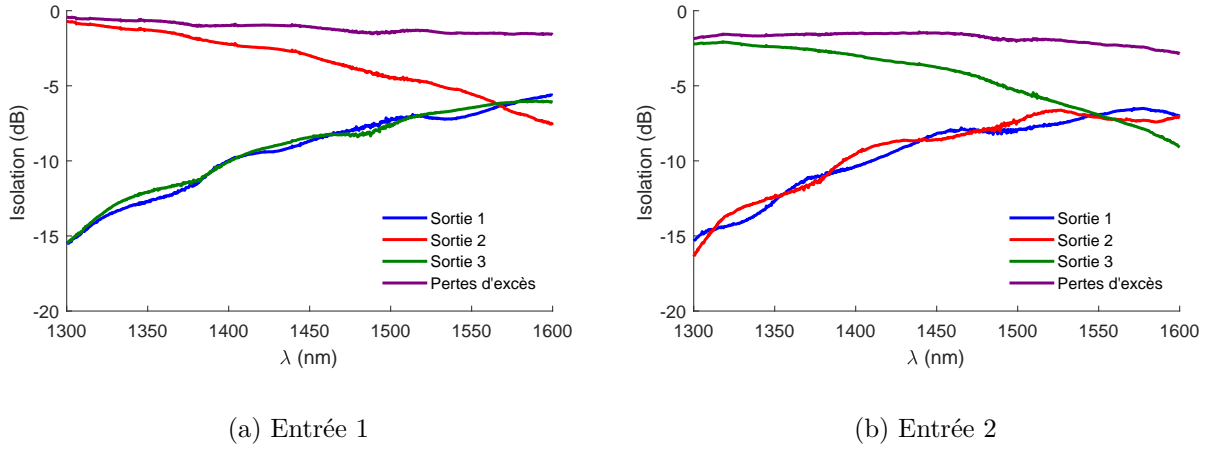
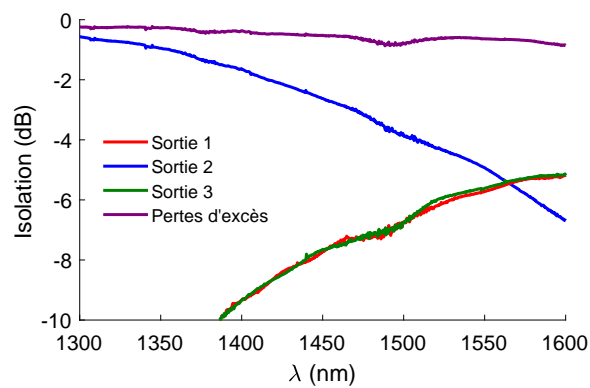


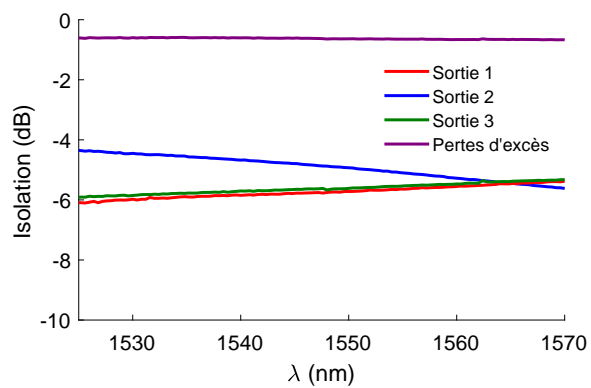
Figure 4.10 Courbes de transmission des coupleurs 3×3 fabriqués selon l'approche 3, pour un signal envoyé dans a) l'entrée 2 et b) l'entrée 3 du coupleur.

Puisque les approches précédentes étaient opposées en performances, il a été choisi une approche intermédiaire, c'est-à-dire l'approche de fusion 4. Par rapport à l'approche 2, la flamme s'approche de moins haut et les blocs sont légèrement moins éloignés, tenant un peu mieux les fibres en place. Par réciprocity, la flamme s'approche de plus haut que pour la fusion 3 et les fibres ont un peu plus de liberté de mouvement à son arrivée. Si on mettait les différentes fusions sur un continuum, la fusion 4 est plus proche de la fusion 2 que de la fusion 3. Concernant les performances de l'approche 4 de la flamme, quatre composants sur huit ont été considérés comme réussis, puisqu'ils satisfont l'équipartition des puissances. Les pertes d'excès sont de 1,26 dB en moyenne se situent entre celles des fusions 2 et 3, en moyenne de 0,85 et 1,65 dB respectivement.

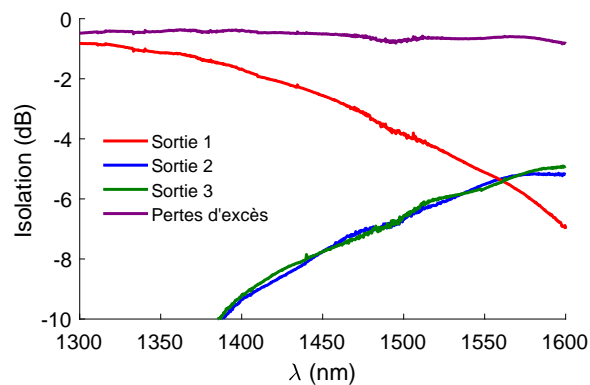
La figure 4.11 présente le meilleur composant en transmission, fabriqué par la fusion 3, avec des pertes d'excès aussi basses que 0,54 dB pour tout le spectre analysé, ou 0,66 dB pour la bande C. Trois des quatre composants sortant de cette recette et présentant l'équipartition ont pu être caractérisés en phase. Le tableau 4.2 résume les valeurs moyennes et les écart-types pour les pertes d'excès et d'insertion des coupleurs pouvant être définis comme des hybrides optiques. En annexe sont présentées les courbes de transmission de tous les coupleurs montrant une équipartition des puissances. Pour le dispositif identifié H4-1, on remarque qu'il y a possiblement un problème d'adiabaticité, car de légères oscillations du signal en fonction de la longueur d'onde sont visibles. On peut voir des oscillations similaires pour le dispositif H4-7. Ces deux dispositifs présentent les pertes les plus importantes des coupleurs fabriqués



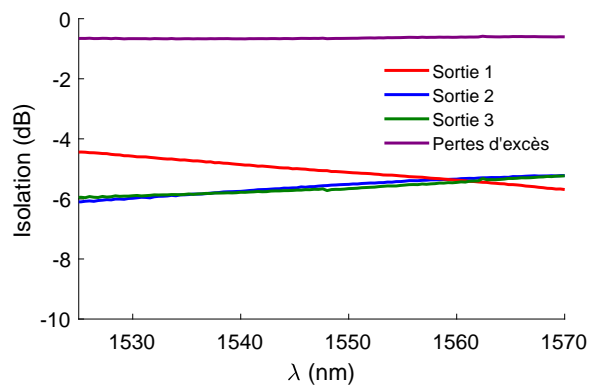
(a) 1300-1600 nm



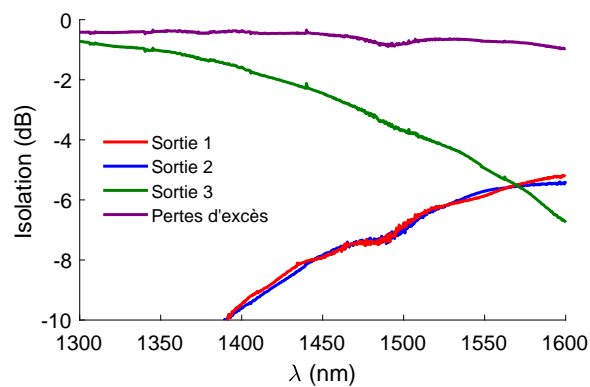
(b) Bande C



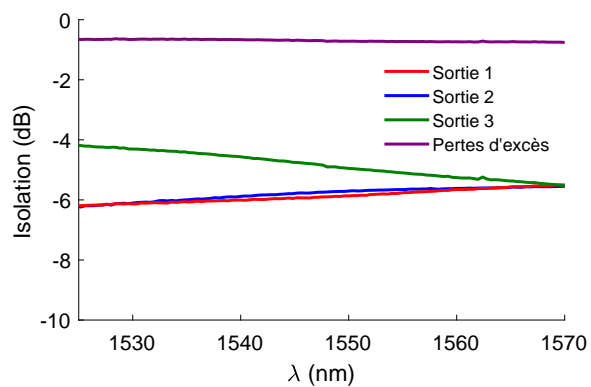
(c) 1300-1600 nm



(d) Bande C



(e) 1300-1600 nm



(f) Bande C

Figure 4.11 Courbes de transmission pour un même coupleur lorsque le signal est injecté dans la branche bleue (a et b), la branche rouge (c et d) et la branche verte (e et f)

par la fusion 4.

Les paramètres de la fusion 5 sont compris entre ceux des fusions 3 et 4. Les fibres sont donc plus contraintes par les blocs d'étirages que pour la fusion 3, mais la descente de la torche est plus longue que pour la fusion 4. Les pertes d'excès de ce dispositif se rapprochent de celles de la fusion 3. Étant donné qu'un seul composant a été fabriqué avec cette méthode, il est difficile de généraliser des conclusions. Cependant, le composant montre une équipartition des puissances et a pu aussi être caractérisé en phase. Il s'agit d'ailleurs du seul composant ayant pu être entièrement caractérisé en phase, car il est le seul à ne pas avoir été rompu en partie ou en totalité.

Les figures 4.12 et 4.13 présentent les résultats de ce coupleur pour toutes les paires d'entrées testées. Les légendes font référence à la convention d'identification des fibres présentée à la figure 2.1, où E_B identifie la branche d'entrée 1 ou la bleue, E_R est la branche d'entrée 2 ou la rouge et E_V réfère à la branche d'entrée 3 ou la verte. Les points associés par exemple à $E_R - E_V$ sont les mesures effectuées aux trois sorties lorsque le signal et la référence sont envoyés dans les entrées 2 et 3, ou rouge et verte. La figure 4.12 ne présente que la phase et sa déviation par rapport aux valeurs attendues de 120 et 240°, ainsi que les limites de performances attendues de $\pm 10^\circ$, identifiées en pointillés. La figure est assez représentative de tous les résultats obtenus pour la phase, c'est-à-dire que les phases mesurées entrent principalement dans les limites établies et qu'elles démontrent très peu de variation avec la longueur d'onde. Les valeurs exactes mesurées des phases et de leurs variations sont présentées au tableau 4.2.

Sur la figure 4.13, chaque groupe de points correspond à une sortie du coupleur. Les points d'une même couleur font état d'une mesure associée à une paire d'entrée, comme pour la figure 4.12. Chaque groupe de points de même couleur dans une région donnée représente l'évolution des phases et des amplitudes en fonction des mêmes longueurs d'onde que pour la figure 4.12. Chaque point représente donc une paire de données (phase et amplitude) à une longueur d'onde donnée, pour une sortie donnée. On voit qu'il y a très peu de variation pour toute la bande C.

Deux prises de mesures ont été effectuées avec le montage en caractérisation de la phase. Les premières mesures ont été prises avant que quelques défauts du montage de caractérisation soient identifiés et réglés. À cause de ces défauts, les amplitudes mesurées par la première caractérisation sont très faibles et non caractérisées. Les résultats des figures 4.12 et 4.13 proviennent de la deuxième prise de données, où les amplitudes mesurées ont été corrigées pour les différences de pertes associées à chaque chemin du montage.

Le tableau 4.2 résume les performances des quatre coupleurs 3×3 entièrement caractérisés

Tableau 4.2 Résumé des performances des hybrides optiques tout-fibre complètement caractérisés.

Propriété	Hybride H4-4	Hybride H4-7	Hybride H4-9	Hybride H5-1
ξ_E , 1300-1600 nm	$0,89 \pm 0,17$ dB	$1,85 \pm 0,21$ dB	$0,54 \pm 0,16$ dB	$1,77 \pm 0,21$ dB
ξ_E , Bande C	$1,04 \pm 0,03$ dB	$1,80 \pm 0,10$ dB	$0,66 \pm 0,03$ dB	$1,94 \pm 0,03$ dB
Phase - 120°	$123,2 \pm 3,6^\circ$	$119,1 \pm 3,6^\circ$	$112,3 \pm 0,9^\circ$	$118,5 \pm 1,7^\circ$
Phase - 240°	$239,5 \pm 3,6^\circ$	$241,6 \pm 3,2^\circ$	$236,6 \pm 2,4^\circ$	$240,8 \pm 2,0^\circ$
Croisement, λ_c	1540 ± 1 nm	1540 ± 30 nm	1565 ± 4 nm	$1546,7 \pm 0,6$ nm
Pertes d'insertion à λ_c	$5,8 \pm 0,4$ dB	$6,5 \pm 0,7$ dB	$5,44 \pm 0,08$ dB	$6,7 \pm 0,3$ dB
Ratio de couplage à λ_c	33,2/32,1/34,7	37,1/34,1/28,8	33,4/32,7/33,9	31,9/33,7/34,4

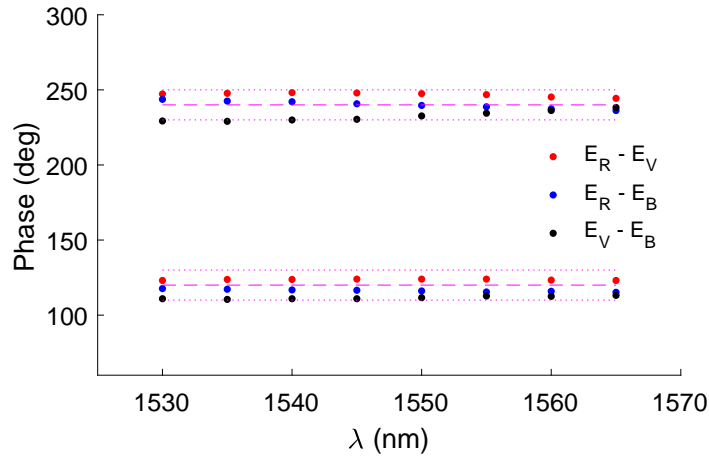


Figure 4.12 Résultats en phase pour les trois paires d'entrées testées.

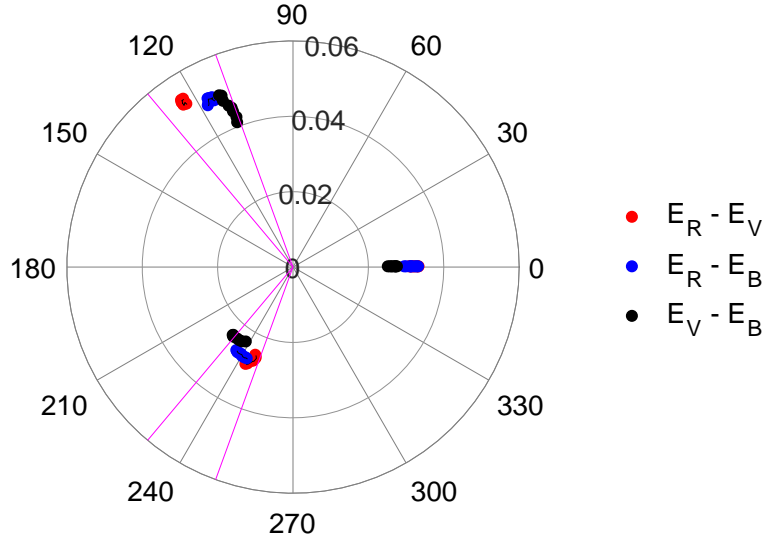


Figure 4.13 Résultats en amplitude et en phase pour les trois paires d'entrées testées.

et pouvant être considérés des hybrides optiques. Les hybrides sont identifiés $HX-Y$, où X fait référence au numéro d'une des fusions décrites au tableau 3.2 et Y à l'essai de la fusion X qui a généré l'hybride en question. Les hybrides optiques ont été analysés et comparés sur la base des paramètres présentés dans la sous-section de la caractérisation. Quelques propriétés intéressantes ressortent de ce tableau. Tout d'abord, les pertes d'excès semblent très stables dans la bande C, beaucoup plus que pour le spectre complet de mesure. Toujours dans la bande C, les phases relatives sont assez proches de celles espérées et varient très peu, de moins de 5° pour tous les hybrides. Le composant présentant la phase la moins proche de celle attendue est l'hybride H4-9, avec un écart de $7,3^\circ$ par rapport au 120° souhaité. Cela peut être expliqué par la longueur d'onde de croisement qui est quelque-peu décentrée à 1565 nm . La phase présentée au tableau 4.2 a été calculée en moyennant les phases obtenues sur la bande C au complet. La longueur d'onde de 1565 nm se trouve à une extrémité de ce spectre, ce qui donne l'impression que les performances en phase de ce dispositif ne sont pas excellentes. Si on avait pu caractériser le coupleur autour de sa longueur d'onde de croisement, la phase aurait probablement été plus proche de 120° . Avec le matériel disponible, la mesure n'a pas été possible et le dispositif aurait dû être étiré légèrement plus longtemps pour obtenir un croisement à une longueur d'onde moins élevée.

Ensuite, les pertes d'insertion sont encore un peu élevées. La valeur attendue pour un composant qui sépare parfaitement le signal en trois est de $4,78\text{ dB}$. Les pertes d'insertion obtenues pour la longueur d'onde de croisement calculée sont plus proches de ce qu'on attendrait d'un coupleur séparant le signal en quatre, où 25% (équivalant à -6 dB) sortirait par chaque

branche.

Enfin, l'élément le plus problématique est la longueur d'onde de croisement, qui varie énormément d'un coupleur à l'autre. De plus, la longueur d'onde de croisement n'est pas toujours la même selon la branche d'injection du signal, la différence étant parfois énorme, par exemple sur l'hybride H4-7 avec un 30 nm de variabilité entre les trois entrées d'injection. On voit un exemple moins flagrant, mais visible, à la figure 4.11 sur les courbes de transmission en gros plan sur la bande C. La longueur d'onde de croisement varie légèrement dépendant si l'injection est faite par l'entrée 1, 2 ou 3.

4.4.1 Difficultés rencontrées et recommandations

Plusieurs difficultés ont été rencontrées au fil de la fabrication des coupleurs 3×3. Pour ne nommer que les plus importantes, il y a de gros problèmes de répétabilité des fusions, d'alignement du montage et de rupture des dispositifs.

Le problème de répétabilité des fusions a été le plus important pendant une bonne partie du projet. En ne changeant aucun paramètre dans les recettes de fusion appliquées sur les fibres, il arrivait souvent que la fusion était très différente d'un essai à l'autre, ou d'un jour à l'autre. Ainsi, pour les mêmes sorties de gaz, la même hauteur de flamme de fusion et le même temps de balayage, pour une fusion par balayage, ou vitesse de balayage pour la fusion à un passage, on obtient des artéfacts de fabrication ou des degrés de fusion différents. Ce phénomène est nettement plus important pour la fusion par balayage, mais tout de même présent pour la fusion à un passage. Quelques hypothèses ont été émises, comme par exemple celle d'un effet de la pression atmosphérique sur les contrôleurs de gaz ou la micro flamme utilisée. D'un jour à l'autre, la quantité minimale de propane permettant l'allumage de la micro flamme n'était pas toujours la même, oscillant entre 2 et 2,3 SCCM. Puisque les contrôleurs peuvent envoyer un débit de gaz se rendant jusqu'à 50 SCCM, cela peut toutefois n'être qu'un effet d'imprécision de l'appareil près de sa limite inférieure.

Une autre observation est qu'il faut laisser la flamme se stabiliser quelques temps en température avant de l'utiliser pour faire les fusions. Ce faisant, les températures de la flamme et de la torche devraient être à l'équilibre et moins perturbées par l'approche de la flamme sur les fibres. Ces dernières sont beaucoup plus froides que la flamme et peuvent avoir une influence sur la température à l'approche de la flamme, jusqu'à ce que le système fibres/flamme/torche soit également en équilibre thermique.

La dernière hypothèse concernant la non répétabilité des fusions concerne les contraintes des fibres. Il a déjà été mentionné que si elles avaient trop de jeu, elles pouvaient facilement bouger

de leur positionnement initial. Lors des fusions par balayage, les blocs d'étirage sur lesquels les fibres sont solidement installées sont beaucoup plus éloignés que lors des fusions à un passage. Cette différence seule pourrait expliquer le manque de contrôle sur la configuration équilatérale avec l'approche par balayage. Aucune fusion par balayage n'a été faite sur des distances aussi courtes que 4 mm, mais il serait intéressant de le tester, car ces fusions courtes ont présenté les meilleurs résultats pour la fusion à un passage. Il serait possiblement plus facile de faire des zones de transitions plus douces avec cette méthode et, par conséquent, diminuer les pertes d'excès.

Les problèmes d'alignement du montage peuvent relativement facilement être diagnostiqués et arrangés. Comme déjà mentionné, le diagnostic d'un mauvais alignement des blocs se fait principalement par une suite de fusions non uniformes, telles que celle présentée à la figure 4.6c. L'alignement se fait à la main, avec une précision dans les dizaines de microns pour chaque degré de liberté. Avec tous les défis de contrôle de la géométrie des fibres en triangle équilatéral, cette précision lors de l'alignement ne semble pas assez bonne. Parfois, après l'alignement, les fusions étaient parfaites pendant une quinzaine d'essais de suite, d'autres fois, il y avait un mélange d'uniformité et de non uniformité des fusions et, plus rarement, les fusions étaient pires qu'avant le réalignement. Pour éviter ce problème, il serait très avantageux de trouver un moyen d'usiner une pièce en un seul bloc où les rainures dans lesquelles on installe les fibres en structure équilatérale sont déjà alignés de part et d'autre d'une ouverture pour la flamme de fusion.

Finalement, les problèmes de rupture des dispositifs étaient de loin les moins commodes, principalement pour les essais réussis. Des composants ont brisé à différentes étapes, soit pendant la fabrication, l'encapsulation ou la caractérisation. Pendant l'étape de fabrication, les problèmes proviennent de contraintes en lien avec les méthodes de fabrication choisies, telle que l'utilisation d'une préforme avant les torsions, ou un étirage trop rapide pour une flamme pas assez chaude. Ces deux cas ont été faciles à régler, la préforme a été abandonnée et la flamme a été rapprochée des fibres lors de l'étape d'étirage pour les ramollir davantage et éviter qu'elles ne brisent.

La rupture en totalité ou en partie des fibres lors de l'encapsulation a causé la perte des trois hybrides optiques fabriqués avec la méthode de fusion 3 et la perte de quelques branches pour les hybrides fabriqués avec les fusion 4 et 5. Puisque les composants réussis ont été fabriqués à partir d'une fusion sur 4 mm, le composant une fois étiré n'est pas très long, un peu en dessous de 2 cm au final. Les outils qui sont normalement utilisés au laboratoire pour encapsuler les coupleurs 2×2 ne sont pas adaptés à des coupleurs de si petites tailles. Il a donc fallu improviser une nouvelle manière d'encapsuler les composants afin de conserver leur

structure en les gardant bien tendus et droits et de les protéger de l'environnement. Ainsi, lors de l'application des points de colle de chaque côté du dispositif, il est arrivé qu'une ou plusieurs fibres se cassent. Des fibres ont également cassé pendant l'installation d'un demi-tube de verre qui sert à protéger la section monolithique et pendant le retrait du dispositif du montage de fusion-étirage pour le placer sur un substrat portatif. Les difficultés éprouvées ici peuvent être évitées en modifiant les pièces mécaniques et la procédure d'encapsulation.

La dernière étape où il y a eu des bris de composant est celle de la caractérisation. La caractérisation requiert beaucoup de manipulations des hybrides optiques, car il faut s'assurer que les trois longueurs des branches d'entrées soient identiques, ainsi que les trois longueurs des branches de sortie. Si une seule des épissures des fibres avec les entrées et sorties du montage de caractérisation se passe mal, il faut réajuster les longueurs des trois branches. Avec un peu de malchance, il est possible de devoir s'y reprendre à trois ou quatre fois avant de pouvoir connecter toutes les entrées du dispositif avec le montage, même chose pour toutes les sorties. Donc, le simple fait de manipuler autant les coupleurs, a causé la perte d'un autre hybride optique entre deux prises de mesures différentes.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

Les objectifs initiaux de la recherche effectuée sont la fabrication d'hybrides optiques 120° tout-fibre de manière répétable et de bonne qualité. Pour être considérés de bonne qualité, les hybrides doivent d'abord avoir des pertes d'excès de moins de 1 dB dans la bande des télécommunications, c'est-à-dire de 1530 à 1565 nm. La longueur d'onde visée du croisement donnant une équipartition de puissance est de 1550 ± 5 nm. La tolérance sur le ratio de couplage à la longueur d'onde de croisement espéré est de $\pm 1\%$ pour des ratios de couplage de 33% entre chaque branche d'entrée et chaque branche de sortie. Finalement, les phases relatives attendues sont de 120° et 240° avec une erreur maximale de 10° .

5.1 Synthèse des travaux

Afin d'atteindre les objectifs fixés, plusieurs méthodes différentes de fabrication ont été utilisées. La première approche testée consiste en essais de fabrication de coupleurs 3×3 sans fusion. Cette approche s'est rapidement avérée une mauvaise piste et n'a pas été explorée en profondeur.

La seconde approche testée consiste en une fusion par balayage et avec torsions. Cette approche s'est divisée en deux sous-méthodes : avec et sans l'utilisation de préforme sur les fibres, préalablement à la fusion. La préforme a pour objectif de stabiliser les torsions à des endroits précis lors de la fusion. Cette approche s'est également avérée sans succès, ayant plus souvent comme conséquence de briser les fibres que de stabiliser les torsions. La version sans préforme a donné de meilleurs résultats dans le sens où quelques dispositifs ont pu être caractérisés en transmission. Les trois dispositifs qui semblaient tendre vers une équipartition avec cette approche avaient cependant des pertes d'excès de 5, 9 et 12,5 dB, trop importantes pour les objectifs de qualité fixés. De plus, les fusions avec torsions ont présenté des comportements imprévisibles, les fibres se déplaçant pendant la fusion.

La troisième approche de fusion testée est la fusion par balayage, cette fois sans torsions. Les dispositifs fabriqués ont présenté en moyenne les meilleures performances en ce qui concerne les pertes d'excès, pouvant être aussi basse que 0,2 dB. Les tests destructifs semblent démontrer la possibilité d'obtenir des structures équilatérales avec cette méthode. Malheureusement, aucun des coupleurs caractérisés en transmission n'a montré une bonne équipartition. L'explication suggérée est que la structure monolithique fusionnée avec la méthode par balayage n'est pas uniforme.

La quatrième et dernière approche consiste en une fusion à un passage. Cette méthode a permis de fabriquer les seuls hybrides caractérisables. On peut dire que le projet a atteint partiellement ses objectifs. Pour les pertes d'excès, quelques dispositifs ont présenté des pertes d'excès en-dessous de 1 dB mais les coupleurs ayant de faibles pertes ne présentent pas une bonne répartition. Un seul hybride a atteint l'objectif de moins de 1 dB de pertes d'excès sur toute la bande C, l'hybride H4-9, avec l'hybride H4-4 qui suit de près avec 1,04 dB. Ce dernier présente des pertes moyennes de seulement 0,89 dB sur la bande totale mesurée (1300–1600 nm). L'objectif concernant la longueur d'onde de croisement à 1550 ± 5 nm n'a pas du tout été atteint, avec des valeurs extrêmement variables. Une attention particulière devra être portée à cette caractéristique en trouvant un moyen plus fin d'ajuster la longueur d'onde de croisement. Le ratio de couplage se situe bien autour de 33% pour chaque branche, mais l'objectif de $33 \pm 1\%$ semble très restrictif. L'objectif n'a été atteint que pour l'hybride H4-9. Finalement, l'objectif concernant les phases relatives a été atteint pour toutes les données ayant pu être recueillies. De plus, les phases semblent assez stables en fonction de la longueur d'onde sur toute la bande C, le plus grand écart-type étant de $3,6^\circ$.

5.2 Limites de la solution proposée

À la lumière des résultats obtenus, la distance initiale entre les blocs d'étirage constitue un paramètre de fabrication important. En effet, la distance entre les blocs qui a donné des bons résultats varie entre 10 et 12 mm, mais cette distance est très petite et à la limite d'adiabaticité des composants. Avec le montage actuel, il semble y avoir un compromis à faire entre le maintien de la géométrie équilatérale et l'adiabaticité des composants fabriqués. Plus les blocs sont près, plus les composants sont équilatéraux, mais plus ils présentent en contrepartie des pertes.

Une autre limite concerne la répétabilité des résultats. Il est possible que l'alignement du montage actuel ne soit pas assez précis pour l'obtention de résultats de fusion répétables d'un alignement à l'autre. L'alignement s'est révélé être un problème pour l'uniformité de la fusion à un passage. Un autre problème possible relié à la méthode de fusion est que la micro-torche ne chauffe pas uniformément les fibres mais qu'elle les chauffe avec un certain gradient en température. Il existe cependant une technologie, appelée *Ring of Fire Technology*¹, adaptée aux fibres optiques basée sur une source de chaleur à base de plasma généré par des électrodes placées telles que la température est uniforme dans la région centrale. Il serait intéressant de faire des tests de fusion à un passage avec ce genre de technologie. Le prix d'un tel montage est toutefois très élevé, même trop élevé pour l'incertitude quant à l'amélioration

1. Développée par la compagnie 3SAE Technology, Inc.

qu'il procurerait réellement sur les procédés de fabrication des coupleurs 3×3 .

5.3 Améliorations futures

Pour le futur, afin d'éviter un alignement répété et possiblement trop grossier, il serait avantageux d'utiliser une paire de pinces machinées en un seul morceau sur lequel les rainures de fixation des fibres en configuration équilatérale sont fixes et donc ne peuvent pas se désaligner. Les fibres pourraient être d'abord fusionnées alors qu'elles sont solidement installées sur le bloc sans possibilité de mouvement.

L'utilisation de torsions pour fabriquer des hybrides optiques à partir de coupleurs 3×3 est à éviter, à moins de trouver le moyen de contrôler précisément ces torsions. Il serait cependant intéressant de tester quelques fusions par balayage alors que les fibres sont confinées solidement entre des blocs très rapprochés, d'une distance d'environ 10 mm. Il serait également très pertinent de développer une méthode d'encapsulation des composants afin de minimiser les bris encourus une fois le dispositif terminé.

RÉFÉRENCES

- T. Birks, “Effect of twist in 3×3 fused tapered couplers”, *Applied optics*, vol. 31, no. 16, pp. 3004–3014, 1992.
- D. Chen, M. Ji, et L. Peng, “Effect of twist on single-mode fiber-optic 3×3 couplers”, *Optical Fiber Technology*, vol. 40, pp. 185–191, 2018.
- A. Davis, S. Wright, M. Pettitt, J. King, et K. Richards, “Coherent optical receiver for 680 mbit/s using phase diversity”, *Electronics Letters*, vol. 22, no. 1, pp. 9–11, 1986.
- P. Dong, C. Xie, et L. L. Buhl, “Monolithic polarization diversity coherent receiver based on 120-degree optical hybrids on silicon”, *Optics Express*, vol. 22, no. 2, pp. 2119–2125, 2014.
- I. P. Giles, R. Chen, et V. Garcia-Munoz, “Fiber based multiplexing and demultiplexing devices for few mode fiber space division multiplexed communications”, dans *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014*. IEEE, 2014, pp. 1–3.
- F. Gonthier, “Conception et realisation de coupleurs multi-fibres integres a des fibres optiques unimodales”, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 01 1993.
- Y. Jung, R. Chen, R. Ismaeel, G. Brambilla, S.-U. Alam, I. Giles, et D. Richardson, “Dual mode fused optical fiber couplers suitable for mode division multiplexed transmission”, *Optics express*, vol. 21, no. 20, pp. 24 326–24 331, 2013.
- E. Khettal, “Fabrication et caractérisation d’hybrides optiques tout-fibre 120° et 90° achromatiques”, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Déc. 2014. En ligne : <https://publications.polymtl.ca/1501/>
- S.-M. Kim, W.-S. Chu, S.-G. Kim, et M.-C. Oh, “Integrated-optic current sensors with a multimode interference waveguide device”, *Optics express*, vol. 24, no. 7, pp. 7426–7435, 2016.
- K. Koo, A. Tveten, et A. Dandridge, “Passive stabilization scheme for fiber interferometers using 3×3 fiber directional couplers”, *Applied Physics Letters*, vol. 41, no. 7, pp. 616–618, 1982.
- H. C. Lefevre, “Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers”, *Electronics Letters*, vol. 16, no. 20, pp. 778–780, September 1980. DOI : 10.1049/e1:19800552

Y. Liu, K. S. Chiang, et Q. Liu, “Symmetric 3×3 optical coupler using three parallel long-period fiber gratings”, *Optics Express*, vol. 15, no. 10, pp. 6494–6499, 2007.

W. J. Madore, “Fabrication et caractérisation d’hybrides optiques tout-fibre”, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Nov. 2012. En ligne : <https://publications.polymtl.ca/924/>

W.-J. Madore, F. Beaudet, A. Ragusich, B. Cauchois-Benavides, M. Leduc, N. Godbout, S. Lacroix, S. O Reilly, M. Faucher, et P. Ouellette, “Hybride optique dans un coupleur monolithique tout-fibre : fabrication et caractérisation”, 05 2010.

D. B. Mortimore, “Theory and fabrication of 4×4 single-mode fused optical fiber couplers”, *Applied optics*, vol. 29, no. 3, pp. 371–374, 1990.

E. Pone, “Modélisation des coupleurs à fibres fusionnées”, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 2005.

R. G. Priest, “Analysis of fiber interferometer utilizing 3×3 fiber coupler”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 10, pp. 1589–1591, 1982.

D. Pustakhod, X. Jiang, E. Van Vliet, K. Williams, et X. Leijtens, “Characterization of 3×3 and 4×4 multimode interference couplers in inp generic photonic integration technology”, dans *Proceedings of the 20th Annual Symposium of the IEEE Photonics Benelux Chapter*, vol. 26, 2015, p. 27.

M. G. Saber, E. El-Fiky, D. Patel, M. Morsy-Osman, D. V. Plant, G. Vall-llosera, P. J. Urban, et B. Dortschy, “A silicon-on-insulator 120° optical hybrid based on $3\times$ multimode interference coupler”, dans *Photonics North (PN), 2017*. IEEE, 2017, pp. 1–1.

M. V. Sarunic, M. A. Choma, C. Yang, et J. A. Izatt, “Instantaneous complex conjugate resolved spectral domain and swept-source oct using 3×3 fiber couplers”, *Optics express*, vol. 13, no. 3, pp. 957–967, 2005.

S. K. Sheem, “Fiber-optic gyroscope with 3×3 directional coupler”, *Applied Physics Letters*, vol. 37, no. 10, pp. 869–871, 1980.

——, “Optical fiber interferometers with 3×3 directional couplers : Analysis”, *Journal of Applied Physics*, vol. 52, no. 6, pp. 3865–3872, 1981.

T. Stephens et G. Nicholson, “Optical homodyne receiver with a six-port fibre coupler”, *Electronics Letters*, vol. 23, no. 21, pp. 1106–1108, 1987.

Y. Takushima, H. Choi, et Y. C. Chung, “Plug-and-play phasor monitor for dxpsk signals based on single delay-interferometer using a 3×3 optical coupler”, dans *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on.* IEEE, 2008, pp. 1–3.

I. M. Villalba Jimenez, “Design of an integrated coherent receiver with polarization diversity”, Mémoire de maîtrise, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.

T.-L. Wu et H.-J. Ou, “A vector power coupling model for analyzing polarization-dependent loss of equilateral triangular 3×3 weakly fused fiber couplers”, *Optics Communications*, vol. 224, no. 1, pp. 81 – 88, 2003. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(03\)01725-5](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01725-5). En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401803017255>

——, “Rigorous analysis of polarization-dependence loss (pdl) for equilateral 3×3 fused fiber couplers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 165–167, Jan 2004. DOI : 10.1109/LPT.2003.819407

C. Xie, P. J. Winzer, G. Raybon, A. H. Gnauck, B. Zhu, T. Geisler, et B. Edvold, “Colorless coherent receiver using 3×3 coupler hybrids and single-ended detection”, *Optics express*, vol. 20, no. 2, pp. 1164–1171, 2012.

T. Xie, “Fused 3×3 single-mode fiber optic couplers for fiber interferometric sensors and coherent communications”, dans *Electronic Components and Technology Conference, 1991. Proceedings., 41st.* IEEE, 1991, pp. 46–49.

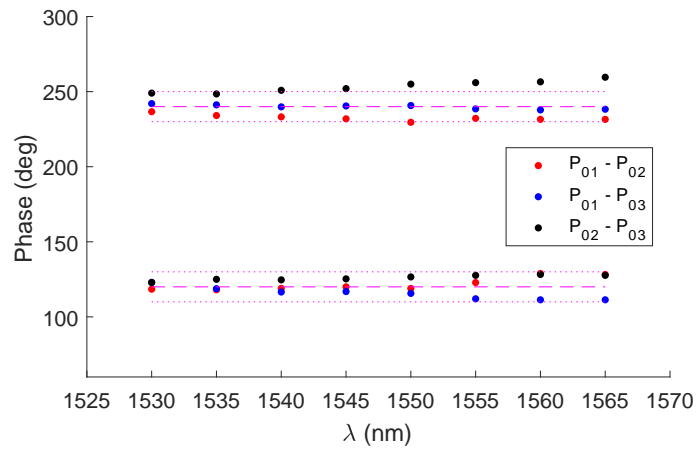
S. Yamashita, “Two-branch double-stage phase-diversity (dspd) coherent receiver using a 3/spl times/3 fiber coupler”, *IEEE photonics technology letters*, vol. 6, no. 11, pp. 1386–1388, 1994.

H. Zhang, M. Zhang, L. Wang, Y. Liao, et D. Wang, “Output noise analysis of optical fiber interferometric sensors using a 3×3 coupler”, *Measurement Science and Technology*, vol. 22, no. 12, p. 125203, 2011.

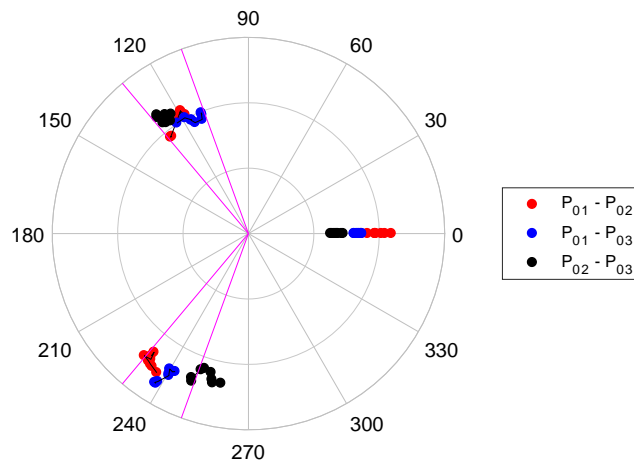
L. Zimmermann, K. Voigt, G. Winzer, K. Petermann, et C. M. Weinert, “C-band optical 90° -hybrids based on silicon-on-insulator 4×4 waveguide couplers”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 3, pp. 143–145, 2009.

ANNEXE A Résultats supplémentaires

A.1 Hybride 4-4

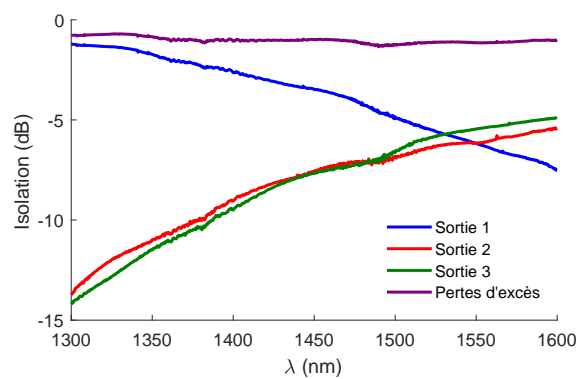


(a) Entrée 1 (bleue)

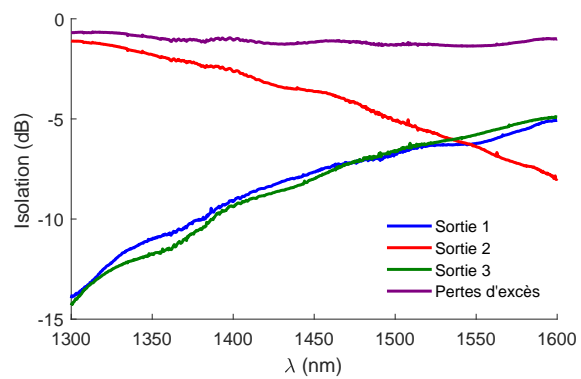


(b) Entrée 2 (rouge)

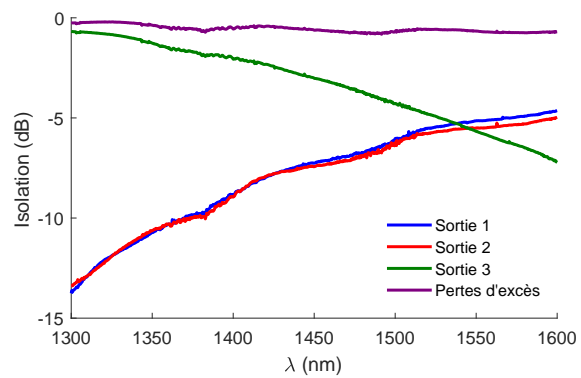
Figure A.1 Résultats de caractérisation en phase de l'hybride H4-4.



(a) Entrée 1 (bleue)



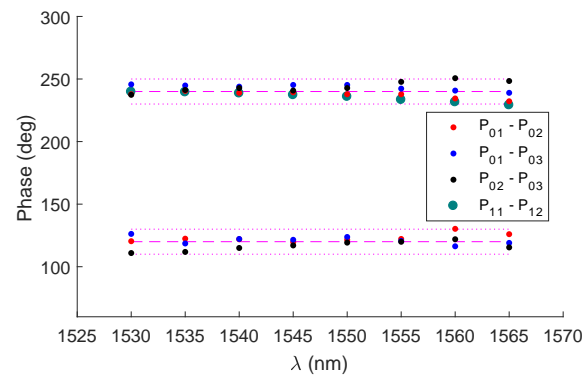
(b) Entrée 2 (rouge)



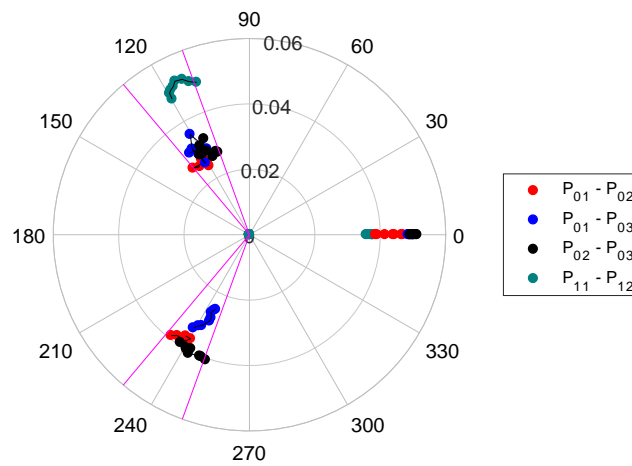
(c) Entrée 3 (verte)

Figure A.2 Courbes de transmission pour l'hybride H4-4.

A.2 Hybride 4-7

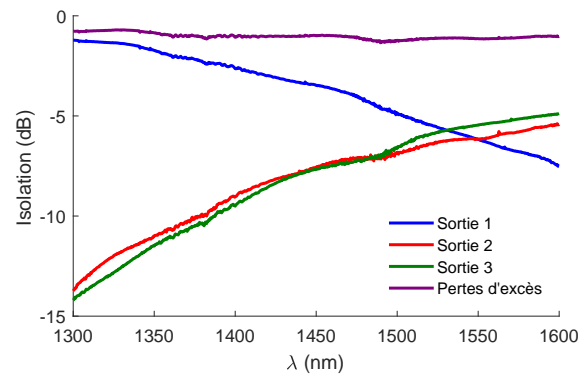


(a) Entrée 1 (bleue)

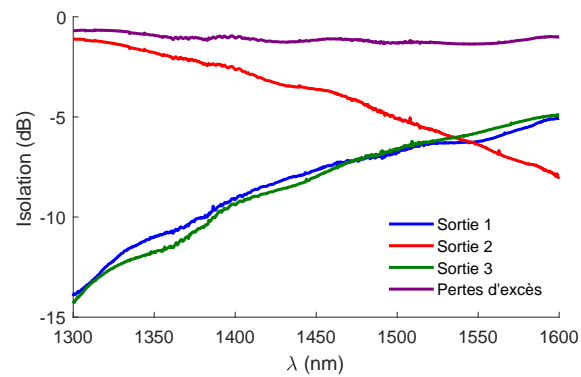


(b) Entrée 2 (rouge)

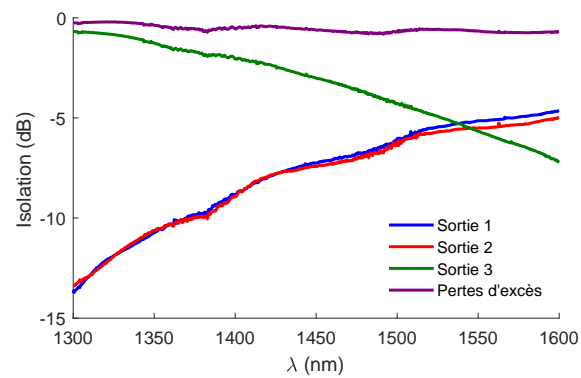
Figure A.3 Résultats de caractérisation en phase de l'hybride H4-7.



(a) Entrée 1 (bleue)



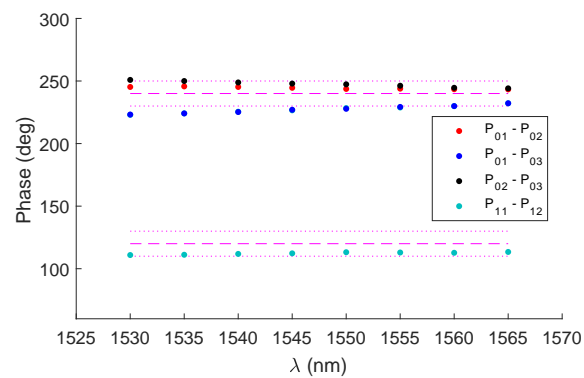
(b) Entrée 2 (rouge)



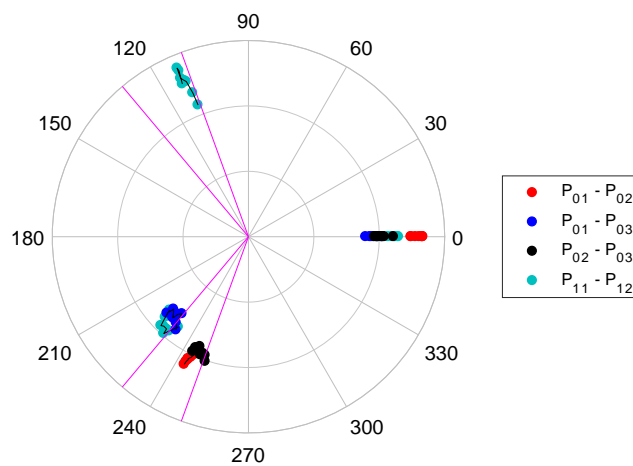
(c) Entrée 3 (verte)

Figure A.4 Courbes de transmission pour l'hybride H4-7.

A.3 Hybride 4-9



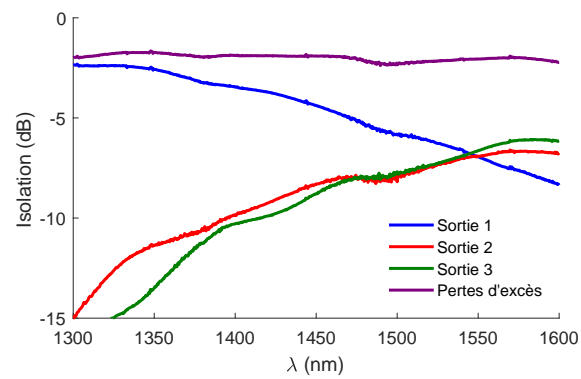
(a) Entrée 1 (bleue)



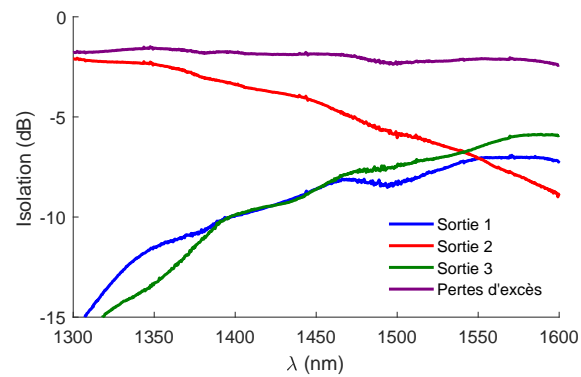
(b) Entrée 2 (rouge)

Figure A.5 Résultats de caractérisation en phase de l'hybride H4-9.

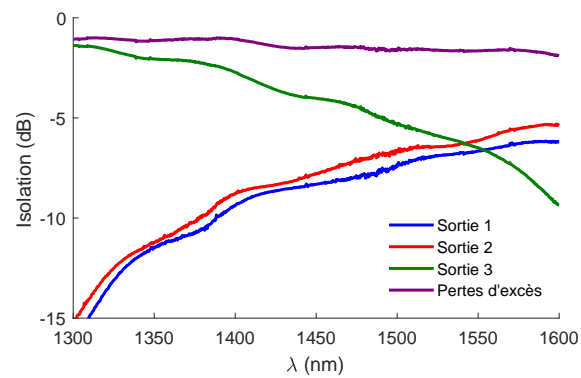
A.4 Hybride 5-1



(a) Entrée 1 (bleue)



(b) Entrée 2 (rouge)



(c) Entrée 3 (verte)

Figure A.6 Courbes de transmission pour l'hybride H5-1.

ANNEXE B Code Mathematica

```

M := {{b, c - d, c}, {c - d, b, c}, {c, c, b}}

EM := Eigensystem[M] // FullSimplify

SEM := Series[EM, {d, 0, 1}] // FullSimplify

FullSimplify[SEM, Assumptions -> c > 0]

{ { (b - c) + d + O[d]^2, (b - c) -  $\frac{d}{3}$  + O[d]^2, (b + 2 c) -  $\frac{2 d}{3}$  + O[d]^2 },
  { {-1, 1, 0}, { - $\frac{1}{2}$  -  $\frac{d}{6 c}$  + O[d]^2, - $\frac{1}{2}$  -  $\frac{d}{6 c}$  + O[d]^2, 1 }, {1 -  $\frac{d}{3 c}$  + O[d]^2, 1 -  $\frac{d}{3 c}$  + O[d]^2, 1 } } }

V1 = Normalize[{1 - e / 3, 1 - e / 3, 1}];
V3 = Normalize[{-1 / 2 - e / 6, -1 / 2 - e / 6, 1}];
V2 = Normalize[{-1, 1, 0}];
E2 = b - c (1 - e);
E3 = b - c (1 + e / 3);
E1 = b + 2 c (1 - e / 3);
P = {V1, V2, V3};
MNicolas = Normal[Series[FullSimplify[
  Dot[Transpose[P], Dot[{Exp[I E1], 0, 0}, {0, Exp[I E2], 0}, {0, 0, Exp[I E3]}]], P],
  Assumptions -> e > 0], {e, 0, 1}]]

{ {  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (2 + e^{3 i c}) + \frac{2}{27} e^{i b - i c} (1 + 6 i c - e^{3 i c} - 3 i c e^{3 i c}) e$ ,
   $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c}) + \frac{1}{27} e^{i b - i c} (2 - 15 i c - 2 e^{3 i c} - 6 i c e^{3 i c}) e$ ,
   $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c}) + \frac{1}{27} e^{i b - i c} (-1 + 3 i c + e^{3 i c} - 6 i c e^{3 i c}) e$ ,
   $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c}) + \frac{1}{27} e^{i b - i c} (2 - 15 i c - 2 e^{3 i c} - 6 i c e^{3 i c}) e$ ,
   $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (2 + e^{3 i c}) + \frac{2}{27} e^{i b - i c} (1 + 6 i c - e^{3 i c} - 3 i c e^{3 i c}) e$ ,
   $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c}) + \frac{1}{27} e^{i b - i c} (-1 + 3 i c + e^{3 i c} - 6 i c e^{3 i c}) e$ ,
   $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c}) + \frac{1}{27} e^{i b - i c} (-1 + 3 i c + e^{3 i c} - 6 i c e^{3 i c}) e$ ,
   $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c}) + \frac{1}{27} e^{i b - i c} (-1 + 3 i c + e^{3 i c} - 6 i c e^{3 i c}) e$ ,
   $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (2 + e^{3 i c}) + \frac{2}{27} e^{i b - i c} (-2 - 3 i c + 2 e^{3 i c} - 3 i c e^{3 i c}) e$  } }

MNicolas /. e -> 0

{ {  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (2 + e^{3 i c})$ ,  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c})$ ,  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c})$  },
  {  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c})$ ,  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (2 + e^{3 i c})$ ,  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c})$  },
  {  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c})$ ,  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (-1 + e^{3 i c})$ ,  $\frac{1}{3} e^{i b - i c} (2 + e^{3 i c})$  } }

```